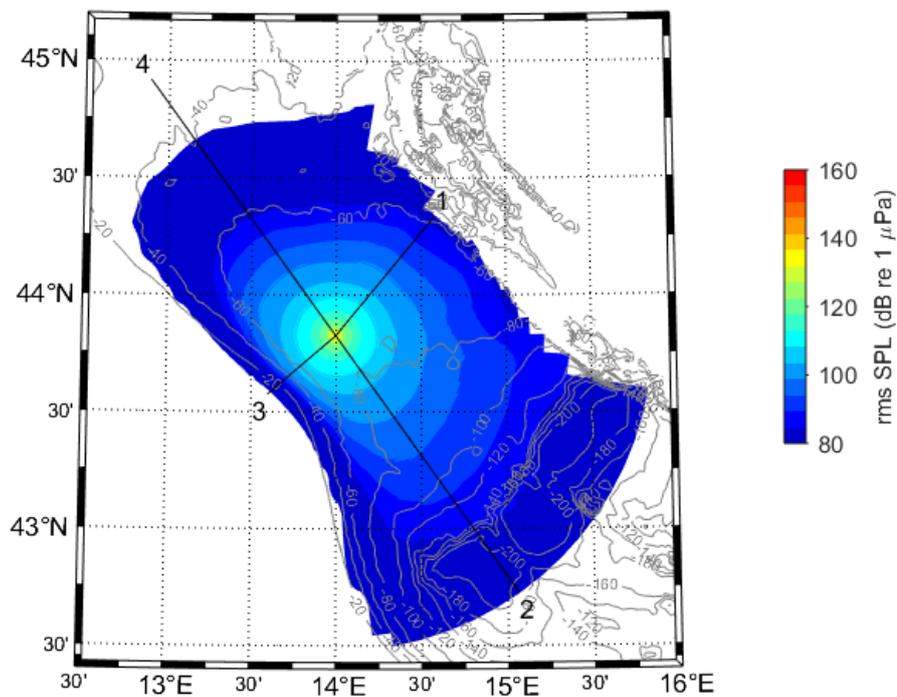


Modellazione numerica del rumore sottomarino associato a operazioni di trivellazione offshore nel Mare Adriatico



This report has been prepared under the DHI Business Management System certified by Bureau Veritas to comply with ISO 9001 (Quality Management)

ISO 9001
Management System Certification

BUREAU VERITAS
Certification Denmark A/S



Modellazione numerica del rumore sottomarino associato a operazioni di trivellazione offshore nel Mare Adriatico

Committente Wood Group PLC
Referente dr. Antonino Cuzzola

Project manager	Andrea Pedroncini
Quality supervisor	Frank Thomsen
Produced by	Uwe Stöber

Codice progetto	22802648
Data di approvazione	13 Giugno 2019
Revisione	1.1
Classificazione	Open



wood.

INDICE

Glossario	iv
Abbreviazioni.....	v
Sintesi non tecnica.....	vi
1	Introduzione.....1
1.1	Scopo dello studio.....1
2	Metodologia.....1
2.1	Area modellata e condizioni ambientali2
2.1.1	Profili di velocità del suono2
2.1.2	Profilo di acidità (pH).....5
2.1.3	Profili del fondale marino5
2.2	Modellazione del rumore.....5
2.2.1	Informazioni sulla sorgente6
2.2.1.1	Spettro della sorgente.....7
2.2.2	Modellazione della propagazione del suono.....8
2.2.2.1	Impostazioni del modello numerico.....10
2.2.3	Pesatura, Livelli cumulati e Aree di Impatto.....11
2.3	Valori soglia.....11
2.4	Livelli sonori12
2.4.1	Pesatura.....13
3	Risultati.....14
3.1	Livelli sonori14
3.1.1	RMS LPS14
3.2	Distanze dai valori soglia17
3.2.1	Cetacei BF (Bassa Frequenza).....17
3.2.2	Cetacei MF (Media Frequenza)18
3.2.3	Cetacei AF (Alta Frequenza)19
3.2.4	Foche (PW).....20
3.2.5	Otarie (OW).....21
3.2.6	Pesci e tartarughe marine.....22
3.3	Sommario.....23
4	Bibliografia25

FIGURE

Figura 2.1	Tracce e direzioni dei piani verticali di modellazione (transetti)	2
Figura 2.2	Profili stagionali di salinità (sopra), temperatura (nel mezzo), e di velocità del suono derivate (sotto). I profili stagionali sono stati ottenuti mediando i dati mensili ottenuti dal Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) relativamente al periodo 2013-2017	3
Figura 2.3	Profili primaverili di salinità (in alto a sinistra), temperatura (in alto a destra), e della velocità del suono derivata (in basso a sinistra). I profili sono risultanti dai dati medi primaverili forniti dal Copernicus Marine Environment Monitoring Service per il periodo 2013-2017. Il profilo del pH (in basso a destra) è stato derivato dal progetto MEDAR/MEDATLAS.....	4
Figura 2.4	Onde sonore (in rosso) che viaggiano dagli strati d'acqua più profondi fino a quelli più superficiali. Sono evidenti le interazioni con il fondale (in verde) e con il pelo libero del mare (in blu).....	6
Figura 2.5	Spettri in terza di ottava normalizzati per attività di perforazione provenienti da diverse fonti di letteratura. La linea spessa tratteggiata mostra la forma dello spettro applicato nel presente studio	7
Figura 2.6	Spettro di frequenza delle attività di trivellazione (campo lontano) senza pesature applicate (blu scuro) e dopo l'applicazione di diverse pesature appropriate.....	8
Figura 2.7	Pesature NOAA applicate. Si ricorda il range modellato arriva fino a 4 kHz. Lo spettro pesato della sorgente sonora è mostrato in Figura 2.6	14
Figura 3.1	Mappa del rumore da attività di perforazione. La batimetria è indicata dalle linee grigie, mentre le linee nere mostrano la posizione dei piani 2D selezionati e rappresentati in Figura 3.2. I numeri in nero si riferiscono al numero del transetto indicato nel testo	15
Figura 3.2	Mappa del rumore da attività di perforazione sui singoli transetti 2D selezionati. La posizione planimetrica dei transetti è mostrata in Figura 3.1	16
Figura 3.3	LES cumulati sulle 24 ore con una pesatura NMFS sulle basse frequenze (SEL_{24h}) per le attività di trivellazione del pozzo Calipso 5 DIR. La linea verde evidenzia il livello di soglia comportamentale, la linea blu indica la soglia per il TTS e quella nera la soglia del PTS	18
Figura 3.4	LES cumulati sulle 24 ore con una pesatura NMFS sulle medie frequenze (SEL_{24h}) per le attività di trivellazione del pozzo Calipso 5 DIR. La linea verde evidenzia il livello di soglia comportamentale, la linea blu indica la soglia per lo TTS e quella nera la soglia dello PTS	19
Figura 3.5	LES cumulati sulle 24 ore con una pesatura NMFS sulle alte frequenze (SEL_{24h}) per le attività di trivellazione del pozzo Calipso 5 DIR. La linea verde evidenzia il livello di soglia comportamentale, la linea blu indica la soglia per il TTS e quella nera la soglia del PTS	20
Figura 3.6	LES cumulati sulle 24 ore con una pesatura NMFS PW (SEL_{24h}) per le attività di trivellazione del pozzo Calipso 5 DIR. La linea verde evidenzia il livello di soglia comportamentale, la linea blu indica la soglia per lo TTS e quella nera la soglia dello PTS	21
Figura 3.7	LES cumulati sulle 24 ore con una pesatura NMFS OW (SEL_{24h}) per le attività di trivellazione del pozzo Calipso 5 DIR. La linea verde evidenzia il livello di soglia comportamentale, la linea blu indica la soglia per lo TTS e quella nera la soglia dello PTS	22
Figura 3.8	LPS per le attività di trivellazione del pozzo Calipso 5 DIR. Il punto blu indica la soglia per le lesioni recuperabili e per il TTS.....	23

TABELLE

Tabella 2.1	Panoramica del profilo geo-acustico del fondale marino utilizzato nella modellazione (C_p = velocità dell'onda di compressione, α = attenuazione di compressione, ρ = densità).....	5
Tabella 2.2	Criteri di esposizione al rumore per i mammiferi marini, i pesci e le tartarughe di mare utilizzati nell'analisi. Le specie di mammiferi marini sono divise in gruppi in base alle definizioni della NMFS (2018).....	12
Tabella 2.3	Gruppi funzionali e larghezze di banda di udibilità associate (NMFS 2018)	14
Tabella 3.1	Distanze limite e aree di impatto per i cetacei BF. Le soglie di LES si riferiscono al LES pesato sulle basse frequenze, ad eccezione della soglia comportamentale che si riferisce al LES non pesato.....	17
Tabella 3.2	Distanze limite e aree di impatto per i cetacei MF. Le soglie di LES si riferiscono al LES pesato sulle medie frequenze, ad eccezione della soglia comportamentale che si riferisce al LES non pesato.....	18
Tabella 3.3	Distanze limite e aree di impatto per i cetacei AF. Le soglie di LES si riferiscono al LES pesato sulle alte frequenze, ad eccezione della soglia comportamentale che si riferisce al LES non pesato.....	19
Tabella 3.4	Distanze di soglia e aree di impatto per le foche (PW). Le soglie di LES si riferiscono al LES pesato col NMFS PW, ad eccezione della soglia comportamentale che si riferisce al LES non pesato.....	20
Tabella 3.5	Distanze di soglia e aree di impatto per le otarie (OW). Le soglie di LES si riferiscono al LES pesato col NMFS OW, ad eccezione della soglia comportamentale che si riferisce al LES non pesato.....	21
Tabella 3.6	Distanze di soglia e area di impatto per pesci e tartarughe marine. La soglia del LPS si riferisce a un LPS non pesato.....	22
Tabella 3.7	Tabella riassuntiva delle massime distanze e delle aree di impatto.....	24

Glossario

Attenuazione	Diminuzione dei livelli di pressione sonora / energia acustica
Banda di ottava	Intervallo tra due frequenze discrete aventi un rapporto di frequenza pari a 2
Banda di terzo di ottava	Intervallo di 1/3 di un'ottava. Tre bande di terzo di ottava adiacenti formano un'ottava
Decibel (dB)	Misura logaritmica dell'intensità o pressione sonora. Il valore in decibel della pressione sonora è pari a $20 \log_{10} (P/P_0)$, con P = pressione attuale e P_0 = pressione di riferimento
Hertz (kHz)	Unità di misura della frequenza, dove 1 Hz = 1 ciclo per secondo. Un Kilohertz vale 1,000 cicli per secondo
Livello di esposizione al suono cumulata	Somma dei livelli di esposizione al suono da un numero di eventi consecutivi. Calcolato come: $LES_{cum} = LES_{singolo} + 10 \log (N)$; N = numero di eventi
Livello sonoro alla fonte	Pressione sonora ad una distanza di riferimento standard di 1 m. Unità di misura: dB re 1 μ Pa a 1 m (talvolta indicato come: @ 1 m)
Livello di pressione sonora	Espressione della pressione sonora in decibel (dB)
Pascal	Unità di misura della pressione, pari a un Newton per metro quadrato
Transmission loss	Perdita di potenza sonora con l'aumento della distanza
Rumore impulsivo	Segnale transitorio emesso in brevi sequenze (impulsi) di breve durata e con picchi di pressione sonora elevati
Temporary threshold shift	Aumento temporaneo della soglia minima di udibilità, causato dall'affaticamento delle cellule ciliate dell'orecchio
Permanent threshold shift	Aumento permanente della soglia minima di udibilità, causato dal danneggiamento delle cellule ciliate dell'orecchio

Abbreviazioni

Abbreviazioni	
μPa	Micropascal
Cum	Cumulato
dB	Decibel
AF	Alta frequenza
Hz	Hertz
kJ	KiloJoule
km	Chilometri
BF	Bassa frequenza
m	Metri
MF	Media frequenza
ms	Millisecondi
Pa	Pascal
PTS	Permanent threshold shift (spostamento permanente di soglia)
TTS	Temporary threshold shift (spostamento temporaneo di soglia)
R	Ricevitore
RAM	Modello Acustico Range-dipendente
RMS	Root Mean Square (quadratico)
S	Secondi
SI	Sirenidi
LF	Livello alla fonte
LES (SEL)	Livello di esposizione al suono (Sound Exposure Level)
LES _{cum} (SEL _{cum})	Livello di esposizione al suono cumulato (Cumulative sound exposure level)
LPS	Livello di pressione sonora
SRC	Fonte
TL	Transmission loss
λ	Lunghezza d'onda

Sintesi non tecnica

1 Le operazioni di trivellazione producono un rumore continuo caratterizzato da livelli di pressione sonora massimi per bande di frequenza comprese tra 20 Hz e 1 kHz che si propagano attraverso la colonna d'acqua. I mammiferi marini, i pesci e le tartarughe di mare risultano sensibili ai suoni e possono quindi risentire del rumore generato da questo tipo di attività. La batimetria locale, insieme ad altri fattori ambientali, possono modificare anche significativamente la trasmissione del suono sott'acqua. Inoltre, ciascuna area possiede una propria biodiversità marina, con peculiari caratteristiche di sensibilità al rumore. Per questo motivo, l'impatto del rumore causato dalla trivellazione deve essere calcolato su base sito-specifica, tenendo in considerazione le caratteristiche uniche del caso in questione;

2 In questo studio sono state investigate per conto di Wood Group PLC le emissioni acustiche generate dalle attività di trivellazione pianificate da parte di Eni nel Mare Adriatico, al largo di Ancona, in corrispondenza del pozzo denominato "Calipso 5 DIR". L'analisi è stata supportata da modellazione numerica del rumore sottomarino, che ha permesso di individuare le diverse aree di impatto in base alla distanza dalla fonte emittente in riferimento a differenti possibili effetti sugli animali (lesioni permanenti e temporanee dell'udito, variazione del comportamento di mammiferi marini, pesci e tartarughe);

3 Il modello della propagazione del rumore è stato implementato per un'area vasta, potenzialmente interessata da effetti sonori delle attività di trivellazione programmate, centrata sul pozzo Calipso 5 DIR. In particolare, sono stati selezionati 72 piani ortogonali (transetti) che si propagano radialmente dalla fonte del rumore, ciascuno rappresentativo di una porzione di mare in una determinata direzione e di dimensioni tali da ricoprire una distanza pari a 150 km dal pozzo. La batimetria lungo ciascun transetto è stata ricavata dalla combinazione dei dati disponibili di cartografia nautica digitale (database CMAP di Jeppesen) e di un rilievo di dettaglio messo a disposizione da Eni. La velocità del suono e i profili di attenuazione derivano invece da informazioni sulla densità della colonna d'acqua (temperatura e salinità) e sul pH ricavati da database pubblici (Copernicus Marine Environment Monitoring Service per Temperatura e Salinità, Medatlas 2002 per il pH). Le informazioni sulla composizione del fondale, importanti per la valutazione dell'eventuale attenuazione sonora al fondo, derivano invece da informazioni su profili stratigrafici nella zona del pozzo fornite da Eni;

Per quanto riguarda la definizione delle proprietà acustiche della fonte di rumore, si è fatto riferimento a dati di letteratura riferiti ai livelli acustici tipicamente associati alle attività di trivellazione: in particolare, è stato stimato il livello associato alle operazioni di trivellazione con sistema *Key Manhattan*. Per la modellazione è stato selezionato un livello di riferimento RMS alla fonte di 190 dB re 1 μ Pa.

La modellazione della propagazione del suono si è basata su uno spettro di frequenza compreso tra i 10 Hz e i 4 kHz, in grado di coprire l'energia principale emessa durante la trivellazione. Per i calcoli numerici è stato utilizzato il Mike Underwater Acoustic Simulator (UAS), sviluppato da DHI.

Per il calcolo delle distanze di impatto, è stato applicato un criterio di esposizione al suono concordato con Wood. Conseguentemente, è stata calcolata la distanza massima e media dalla fonte di rumore alla quale il livello acustico soddisfa il suddetto criterio.

Le principali assunzioni adottate per il modello numerico, elencate di seguito, risultano ampiamente conservative:

- adozione di un livello sonoro RMS alla fonte pari a 190 dB re 1 μ Pa: data la tipologia di macchinario che si adotterà per la trivellazione, tale valore è da considerarsi cautelativo;

- a seguito dell'analisi climatologica sui profili di densità del Mare Adriatico, è stato selezionato per il modello, cautelativamente, il profilo medio primaverile, che massimizza la velocità di propagazione del suono sulle lunghe distanze;
- nonostante la fonte del rumore sia posizionata in prossimità del fondale, a favore di sicurezza la sorgente sonora nel modello è stata posizionata ad una profondità intermedia della colonna d'acqua.

Complessivamente, le assunzioni portano ad una stima conservativa dei livelli sonori attesi.

4 I risultati della modellazione hanno messo in luce una forte dipendenza della trasmissione del suono dalla batimetria, risultando in notevoli differenze dei livelli acustici nelle diverse direzioni di propagazione. Questi risultati sono riportati in mappe del suono che rappresentano la propagazione orizzontale del rumore.

Le aree di impatto sono state individuate in riferimento a diversi gruppi di animali, divisi in base alle loro caratteristiche di sensibilità uditiva al rumore ("Hearing Groups"). In particolare, sono stati considerati i cetacei sensibili alle basse, medie e alte frequenze, i pinnipedi quali foche e otarie, i pesci e le tartarughe di mare.

Le distanze limite e le aree di impatto risultano generalmente basse per tutti i gruppi uditivi analizzati. Il gruppo uditivo che ha mostrato maggior sensibilità al rumore derivato dalla trivellazione, in base ai limiti definiti dal National Marine Fisheries Service (NMFS) degli Stati Uniti nel 2018, è quello dei "cetacei bassa frequenza", che mostrano uno Spostamento Temporaneo di Soglia uditiva (TTS) per distanze fino a 2.4 km e uno spostamento Permanente di Soglia uditiva (PTS) per distanze fino a 0.2 km, corrispondenti ad aree di impatto rispettivamente pari a 18 km² (TTS) e 0.12 km² (PTS).

Nel recente rapporto CNR "Cetacei marini e rettili marini nell'area vasta del bacino adriatico – presenza e distribuzione" è peraltro evidenziato che durante le campagne pregresse effettuate nella porzione di mare prossima alla piattaforma Calipso (tra il 2003 e il 2005) sono stati avvistati esemplari di *T. truncatus* e di *C. caretta*. Sempre facendo riferimento al rapporto CNR, il *T. truncatus* risulta di gran lunga la specie più comune anche facendo riferimento ad un vasto areale intorno alla piattaforma Calipso (da campagne effettuate tra il 2013 ed il 2019 in concomitanza con la realizzazione di alcune strutture di estrazione offshore: Fauzia, Elettra, Clara NW e Bonaccia NW). *T. truncatus* si colloca nel gruppo uditivo dei "cetacei media frequenza", per il quale nel caso in esame si riscontra uno Spostamento Temporaneo di Soglia uditiva (TTS) e uno Spostamento Permanente di Soglia uditiva (PTS) per distanze non superiori a 0.1 km, corrispondenti ad aree di impatto, sia per TTS che per PTS, pari a 0.03 km².

1 Introduzione

Le attività illustrate nel presente elaborato sono finalizzate alla modellazione delle emissioni acustiche delle attività di trivellazione pianificate da parte di Eni nel Mare Adriatico, al largo di Ancona, in corrispondenza del pozzo denominato "Calipso 5 DIR". La modellazione è stata predisposta in riferimento ad un target potenzialmente impattato composto da mammiferi marini, tartarughe e pesci adottando quali soglie di riferimento per le varie specie, su indicazione di Wood Group PLC, quelle definite dal National Marine Fisheries Service (NMFS) degli Stati Uniti nel 2018.

Nei capitoli a seguire vengono illustrati l'approccio metodologico adottato ed i risultati della modellazione numerica della propagazione del rumore sottomarino generato dalla trivellazione, in termini di livelli sonori opportunamente confrontati con le soglie sopra richiamate.

1.1 Scopo dello studio

Il modello numerico si basa su dati batimetrici recenti che coprono l'intera area che circonda il sito interessato dalle operazioni di trivellazione, con un raggio fino a 150 km dal pozzo, e su una caratterizzazione di base della stratigrafia del fondale. Sono stati inoltre utilizzati dati dettagliati sulla velocità di propagazione del suono e sui profili verticali di attenuazione. Il modello è implementato per un'area sufficientemente estesa da includere tutte le zone di possibile esposizione a livelli sonori in grado da mettere potenzialmente a rischio la salute delle specie target.

Il modello di propagazione del rumore propaga i livelli sonori a diverse distanze e profondità dal sito di perforazione. Nello specifico, i livelli sonori presentati nel modello sono:

- l'ampiezza massima della pressione acustica (RMS) riferita a 1 μPa ;
- i livelli di esposizione al rumore cumulati su 24 ore.

Nella modellazione si è tenuto conto di tutti i range dello spettro di frequenze biologicamente rilevanti in relazione alla distanza che queste percorrono partendo dalla fonte. Le fasce di impatto sono calcolate per una varietà di criteri di esposizione al rumore che tengono conto di tutti gli organismi ricettori nell'area di studio.

2 Metodologia

Questo capitolo illustra la metodologia utilizzata per la modellazione acustica.

I fattori ambientali considerati nel modello di propagazione del suono includono:

- la localizzazione del sito e la batimetria;
- i profili di velocità del suono (funzione di temperatura e salinità);
- i profili di pH;
- le caratteristiche del fondale marino.

Di seguito vengono fornite informazioni più dettagliate sulle assunzioni adottate per la modellazione della fonte del rumore e per la scelta dei parametri numerici utilizzati nel modello. Viene infine descritta l'attività di post processamento dei risultati finalizzata alla generazione delle mappe di esposizione al rumore, funzionale all'analisi degli impatti.

2.1 Area modellata e condizioni ambientali

L'area modellata ha come centro il pozzo di trivellazione denominato Calipso 5 DIR, posto in prossimità della piattaforma Calipso, situata a circa 35 km di distanza dalla costa ad una profondità del fondale pari a circa 75 m.

L'area interessata dalle operazioni risulta assai piccola se confrontata con l'area potenzialmente impattata dal rumore sottomarino generato dalla trivellazione, considerando che questo tipo di pressione può propagarsi dalla fonte per distanze relativamente elevate. In base all'esperienza pregressa di DHI e dati ricavati dalla letteratura, si è assunto che l'area da modellare debba includere tutte le zone nelle varie direzioni entro i 150 km dalla fonte. Per garantire una precisione adeguata, si è deciso di implementare nel modello 72 piani verticali (trasetti), ciascuno avente una lunghezza fino a 150 km (la lunghezza è naturalmente inferiore se si incontra prima la costa).

Le tracce e le direzioni dei piani verticali (trasetti) di modellazione sono riportate insieme alla batimetria in Figura 2.1. Viste le profondità, da un punto di vista acustico, l'area presenta le caratteristiche tipiche di "propagazione del rumore in acque basse".

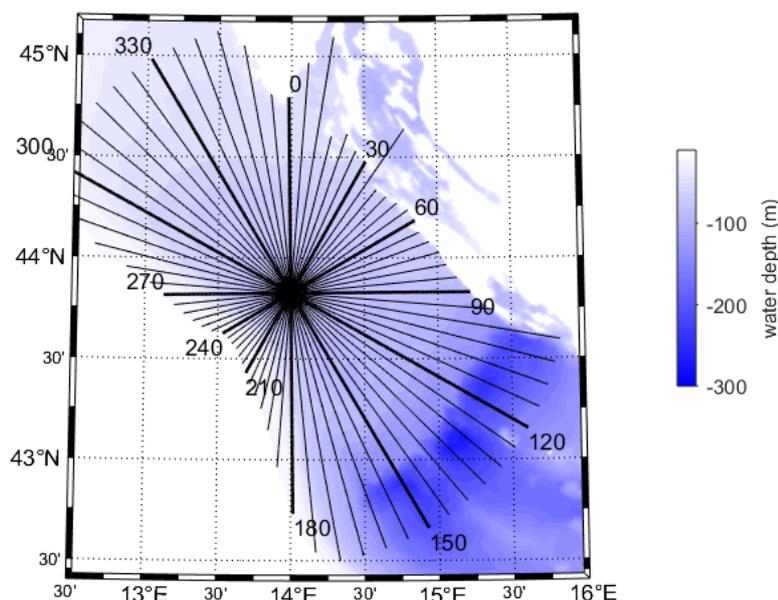


Figura 2.1 Tracce e direzioni dei piani verticali di modellazione (trasetti)

2.1.1 Profili di velocità del suono

La costruzione dei profili di velocità del suono si è basata sui dati di temperatura e salinità dal Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS), estratti per il quinquennio 2013-2017 come valori medi mensili alle diverse profondità per un punto rappresentativo della porzione centrale del Mare Adriatico. Successivamente, utilizzando l'equazione proposta dall'UNESCO (Unesco, 1983), i singoli profili di temperatura e salinità sono stati convertiti in profili di velocità del suono e successivamente processati in modo da restituire degli andamenti stagionali, come mostrato in Figura 2.2.

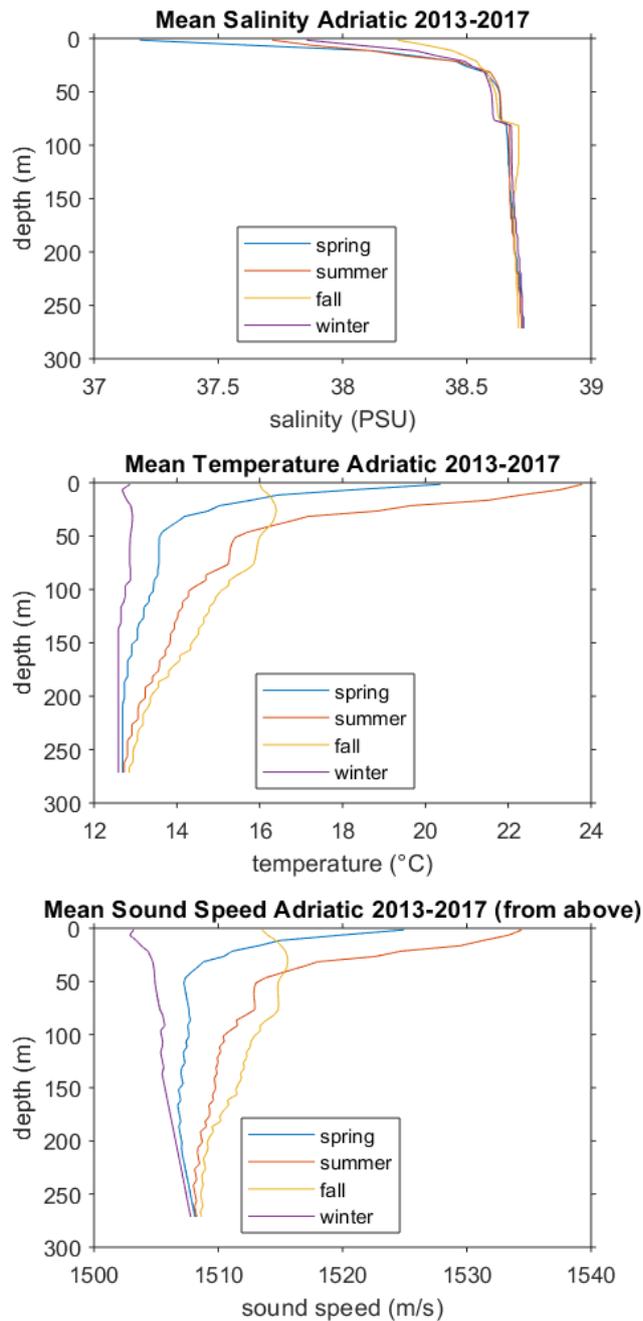


Figura 2.2 Profili stagionali di salinità (sopra), temperatura (nel mezzo), e di velocità del suono derivate (sotto). I profili stagionali sono stati ottenuti mediando i dati mensili ottenuti dal Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) relativamente al periodo 2013-2017

Sebbene la massima velocità di propagazione sonora si osservi per gli strati più superficiali nel periodo estivo, risulta più conservativo adottare il profilo che presenta il cambio di pendenza più repentino e tali caratteristiche sono proprie del profilo primaverile. Quest'ultimo profilo è stato pertanto utilizzato come riferimento per tutte le simulazioni (Figura 2.3).

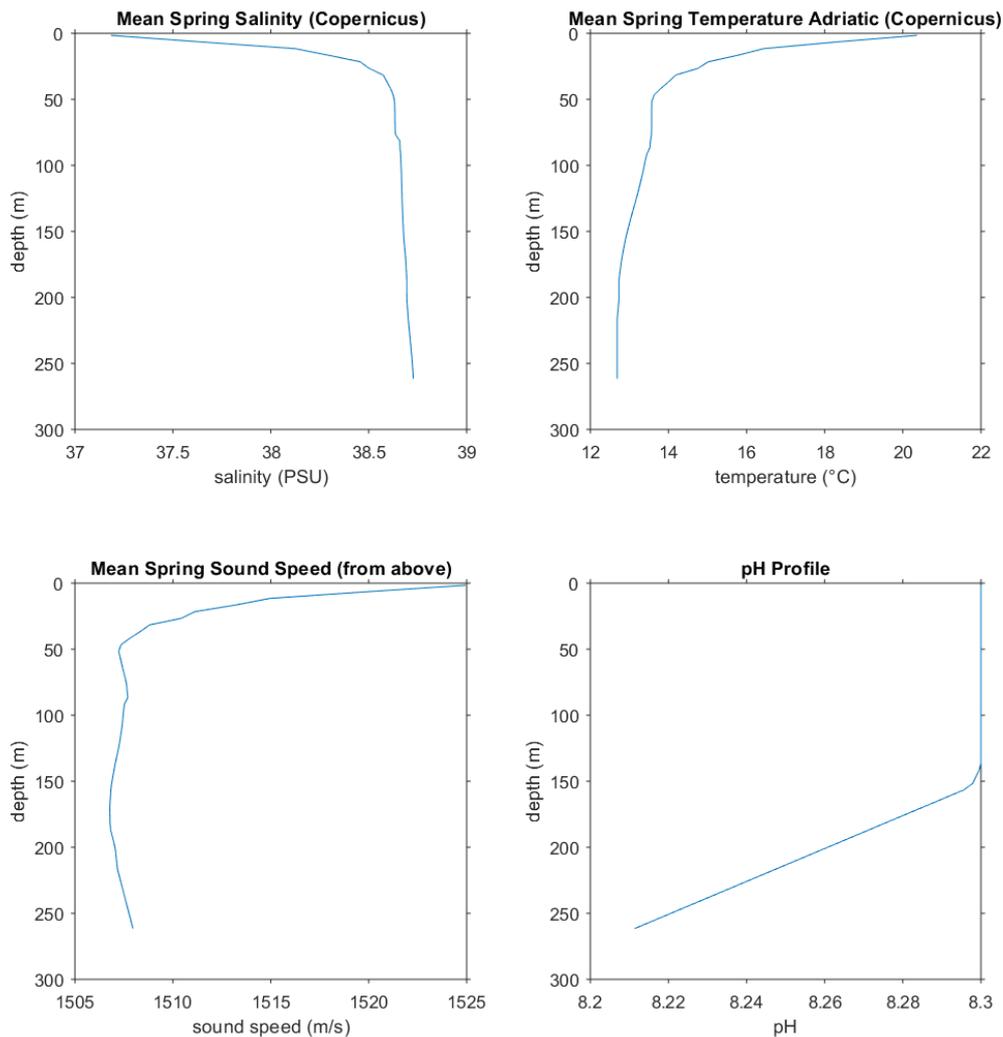


Figura 2.3 Profili primaverili di salinità (in alto a sinistra), temperatura (in alto a destra), e della velocità del suono derivata (in basso a sinistra). I profili sono risultanti dai dati medi primaverili forniti dal Copernicus Marine Environment Monitoring Service per il periodo 2013-2017. Il profilo del pH (in basso a destra) è stato derivato dal progetto MEDAR/MEDATLAS

Sia il fondale marino, sia la superficie del mare possono avere un impatto significativo sulla propagazione del suono. In prossimità del pelo libero è particolarmente importante la rifrazione nella direzione della superficie (dal basso verso l'alto) che si può avere in condizioni di mare mosso. In aggiunta alle dissipazioni dovute a "scattering"¹ quando il suono raggiunge la superficie marina irregolare, in prossimità del pelo libero ed in presenza di onde si verifica un'intrusione di bolle d'aria nello strato più superficiale, generate principalmente dal frangimento delle onde. Lo strato di bolle che si viene così a formare presso la superficie del mare può comportare un'attenuazione significativa del suono causata dall'ulteriore scattering indotto dallo strato superficiale di bolle².

Al di là della perdita trasmissiva causata dal fenomeno di scattering, il suono è ulteriormente attenuato dalla rifrazione causata dalla variazione spaziale della velocità del suono. Anche se la concentrazione volumetrica delle bolle d'aria infiltrate è relativamente bassa - normalmente pari

¹ Lo scattering è un meccanismo di dissipazione di energia, interferenza e vibrazione.

² L'attenuazione del suono è causata dallo scattering delle bolle in risonanza. Alla propria frequenza di risonanza, una bolla appare molto più grande della sua reale geometria ad un'onda sonora incidente (Matuschek and Betke 2009)

all'1% – essa presenta un effetto assai significativo sulla velocità di propagazione del suono anche per concentrazioni molto basse³ (Jensen et al. 2011). In particolare, la propagazione sonora delle alte frequenze è altamente influenzata dal meccanismo di attenuazione provocato dalle bolle d'aria. I fenomeni sopra descritti spiegano perché, nell'ottica della mitigazione degli effetti causati dal rumore in ambiente marino, l'infiltrazione di bolle d'aria nei pressi di una fonte di rumore si presenta come uno strumento di mitigazione molto efficace.

2.1.2 Profilo di acidità (pH)

In aggiunta ai profili di salinità e di temperatura da cui vengono derivati i profili di velocità del suono (vedi sopra), Mike UAS richiede la disponibilità di profili del pH per calcolare l'attenuazione sonora che avviene nella colonna d'acqua. UAS applica infatti il modello empirico proposto da (Francois e Garrison 1982a, 1982b) che considera l'assorbimento del suono da parte dell'acido borico, del solfato di magnesio e dell'acqua pura.

I dati di pH utilizzati sono stati derivati dal database MEDAR/MEDATLAS (MEDAR Group, 2002).

2.1.3 Profili del fondale marino

Le proprietà del fondale marino sono state assunte sulla base delle informazioni ricavate dai dati lito-stratigrafici riportati nello Studio di Impatto Ambientale del pozzo offshore "Calipso 5 DIR". Il fondale è composto da argilla grigia per circa il 75% e da sabbia e limo per circa il 25%. Nel modello è stato applicato un layer composto da un unico strato di 200 m di spessore di argilla grigia, sabbia e limo. In Tabella 2.1 vengono riassunte le proprietà acustiche del layer.

Tabella 2.1 Panoramica del profilo geo-acustico del fondale marino utilizzato nella modellazione (C_p = velocità dell'onda di compressione, α = attenuazione di compressione, ρ = densità).

Layer del fondale (m)	Materiale	Proprietà geo-acustiche
0 – 200	Argilla grigia, sabbia, limo	$C_p = 1528 \text{ m/s}$ $\alpha = 0.375 \text{ dB}/\lambda$ $\rho = 1.575 \text{ g/cm}^3$

2.2 Modellazione del rumore

Le operazioni di trivellazione producono un rumore continuo che si propaga attraverso la colonna d'acqua e al di sotto del fondale marino. Inevitabilmente l'energia sonora viene irradiata anche orizzontalmente rispetto alla fonte emittente. La presenza di diverse vie di propagazione fa sì che le onde sonore vengano rimbalzate dalla superficie e dal fondale marino, oltre che re-irradiate per fenomeni di riverbero che si generano negli strati a diversa profondità, incrementando così ulteriormente la complessità del segnale ricevuto.

Le variazioni nella salinità e nella temperatura alterano la rifrazione del suono nella colonna d'acqua. Queste proprietà di rifrazione hanno un impatto profondo sulla trasmissione dell'energia acustica, in particolare in acque basse con fondali irregolari e con una superficie del mare interessata da moto ondoso non trascurabile.

³ Le bolle possono portare a una differenza significativa nella velocità del suono rispetto alla normale acqua marina, alterando quindi le condizioni locali di rifrazione. In altre parole, le bolle d'aria nell'acqua creano una variazione dell'impedenza, in grado di bloccare la trasmissione sonora

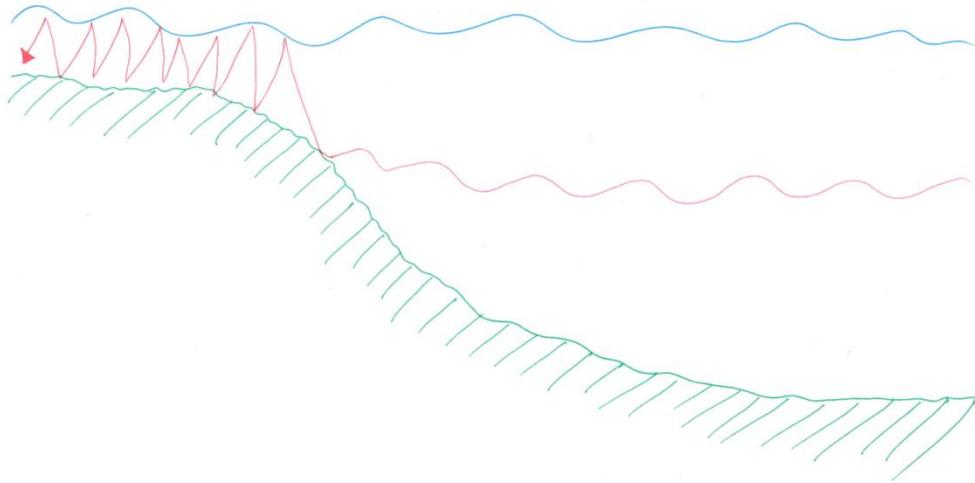


Figura 2.4 Onde sonore (in rosso) che viaggiano dagli strati d'acqua più profondi fino a quelli più superficiali. Sono evidenti le interazioni con il fondale (in verde) e con il pelo libero del mare (in blu)

In generale, nell'ambiente costiero, più è bassa la frequenza e meglio il suono riesce a propagarsi, a meno che la frequenza non scenda al di sotto del limite minimo per la propagazione del suono a una data profondità dell'acqua (e.g., Urick 1983). Al contrario, le componenti ad alta frequenza sono molto più attenuate nelle acque basse. In queste condizioni, si manifesta anche un'interazione importante del suono con il fondale, con un assorbimento più rapido di quanto avviene in acque profonde. Nelle acque superficiali, anche il cosiddetto "spread geometrico"⁴ può risultare importante.

2.2.1 Informazioni sulla sorgente

La fonte del rumore che viene analizzata in questo studio è la piattaforma mobile di trivellazione tipo *Key Manhattan*, di dimensioni pari a circa 75 x 60 m e capace di operare fino a 100 m di profondità. Questo tipo di piattaforma, denominata *Jack-up*, è formata da un *deck* galleggiante di acciaio con 3 o più gambe mobili grazie alle quali lo scafo può essere alzato o abbassato. La piattaforma viene rimorchiata fino al sito da 2 o più rimorchiatori e una volta raggiunta la posizione finale le gambe del jack up vengono abbassate ed ancorate a terra, e il deck viene sollevato al di sopra del livello del mare.

Gran parte dell'analisi è stata focalizzata sull'impatto acustico complessivo nella forma di livello di esposizione al suono cumulato (LES cumulato o LES_{cum}) emesso nella colonna d'acqua. Il livello di esposizione al suono cumulato rappresenta la migliore descrizione analitica della "dose acustica" derivante da un'attività e viene comunemente utilizzato nello studio dell'acustica sottomarina (si veda per esempio Gill, Bartlett, and Thomsen 2012). Fondamentalmente, i singoli eventi acustici vengono sommati insieme fino ad arrivare alla "dose". Il termine non deve essere confuso con l'"impatto cumulato", che viene usato nell'analisi degli impatti derivanti da diverse attività, con varie sorgenti sonore poste ad una certa distanza l'una dall'altra. Considerando la continuità del suono, il LES non cumulato corrisponde alla media quadratica del livello di pressione sonora (RMS LPS) calcolata su una durata di 1 s.

Il rumore associato alle attività di trivellazione copre una banda di frequenza piuttosto ampia (da 20 Hz a 1 kHz), ma occasionalmente si sono riscontrate frequenze anche inferiori (Wyatt, 2008, Tabella 3.4.1). I valori di pressione sonora RMS tipici della trivellazione possono variare tra 115

⁴ Riduzione dell'energia sonora associata all'incremento del volume d'acqua interessato dalla perturbazione allontanandosi dalla sorgente

e 195 dB re 1 μ Pa in funzione della distanza dalla sorgente (Wyatt, 2008, Tabella 3.4.1). Tali valori corrispondono a un livello alla sorgente compreso tra 154 e 195 dB re 1 μ Pa a 1 m. I livelli massimi sono comunque associabili ad attività di perforazione da navi che necessitano di mantenere la posizione per operare. Erbe e McPherson (2017) riportano un livello di superamento pari al 5% per valori di 188 dB re 1 μ Pa per una piattaforma di trivellazione di tipo jack-up di dimensioni molto inferiori rispetto alla piattaforma *Key Manhattan*. Combinando il livello massimo registrato alla fonte per una nave di perforazione e il livello di superamento del 5% riscontrato per una piattaforma di modeste dimensioni, è stato considerato come conservativo un livello RMS alla fonte di 190 dB re 1 μ Pa, valutato anche come rappresentativo delle operazioni di trivellazione della *Key Manhattan*.

2.2.1.1 Spettro della sorgente

Similmente all'ampio range di livelli di pressione sonora RMS osservati, si riscontra una grande variabilità anche nella forma dei vari spettri di emissione associabili alle operazioni di perforazione dei pozzi (Figura 2.5), tanto che le differenze tra i differenti livelli spettrali possono raggiungere valori anche maggiori di 15 dB. Inoltre, molti spettri mostrano picchi distinti al variare del valore dei terzi d'ottava. Lo spettro osservato da Green (1986) viene considerato il più rappresentativo, essendo composto dai valori medi dei tutti gli altri spettri rappresentati e mostra picchi di frequenza meno pronunciati (e quindi più facilmente applicabili in generale). Una volta selezionata la forma dello spettro per il presente studio, quest'ultimo è stato scalato in modo da far coincidere i livelli di pressione sonora alla fonte validi per il caso specifico.

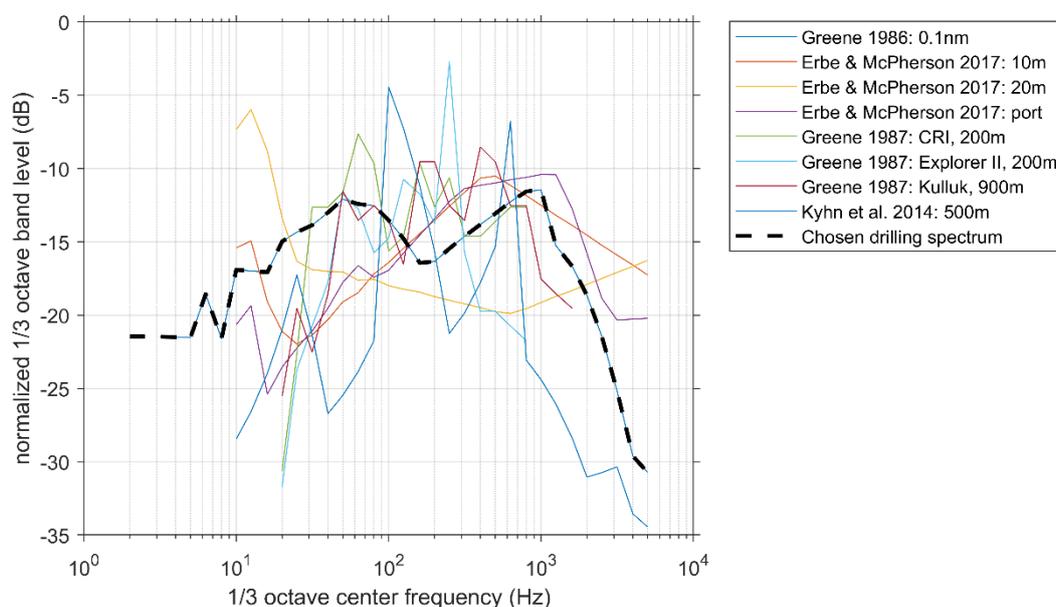


Figura 2.5 Spettri in terza di ottava normalizzati per attività di perforazione provenienti da diverse fonti di letteratura. La linea spessa tratteggiata mostra la forma dello spettro applicato nel presente studio

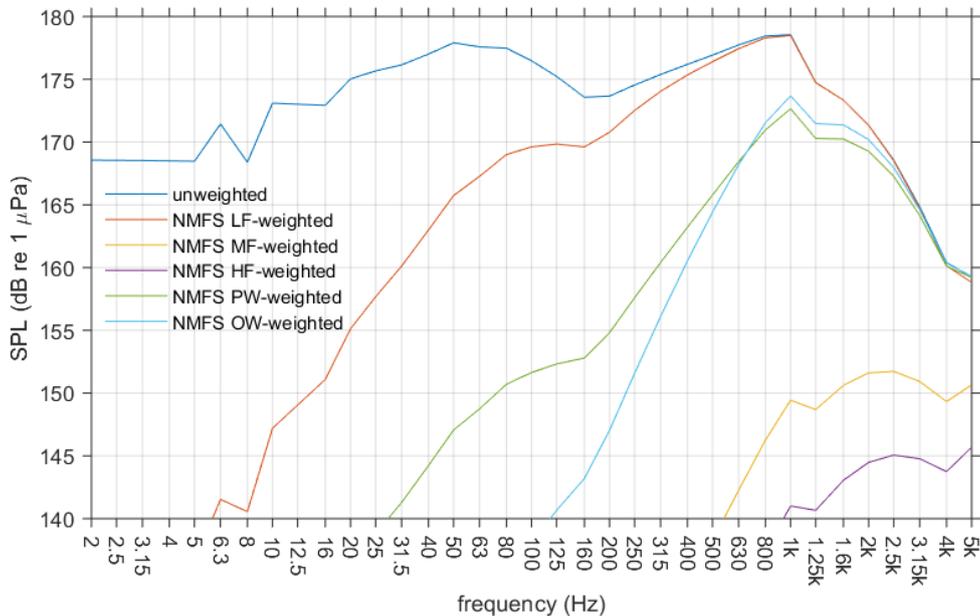


Figura 2.6 Spettro di frequenza delle attività di trivellazione (campo lontano) senza pesature applicate (blu scuro) e dopo l'applicazione di diverse pesature appropriate

Lo spettro in frequenza alla sorgente riportato in Figura 2.6 copre un range compreso tra i 2 Hz ed i 5 kHz. Gran parte dell'energia è però localizzata nella terza di ottava con frequenze centrali di 50–80 Hz e 0.8 – 1 kHz. Considerando che il tempo di calcolo del modello aumenta significativamente con la frequenza, il dominio di frequenza considerato nelle simulazioni è stato ridotto a coprire l'intervallo che copre la maggior parte del contenuto energetico. Le frequenze modellate quindi variano da 10 Hz a 4 kHz, ricoprendo più del 99% dell'energia nello spettro completo, che varia da 10 Hz a 5 kHz. Considerando la natura logaritmica dei dB, i LES risultanti nei casi di spettro intero e ridotto differiscono di meno di 0.3 dB.

Dopo aver applicato le pesature proposte dal NOAA (NMFS, 2018), le bande energetiche più intense risultano avere frequenze centrali di 1 kHz per il gruppo “cetacei a bassa frequenza” (BF), le foche (PW) e le otarie (OW) e di 2.0–2.5 kHz per i “cetacei a media e alta frequenza” (MF e AF). Il peso relativo attribuito alle frequenze più elevate è naturalmente incrementato a seguito della riduzione delle componenti a bassa frequenza. Il range di frequenze modellate copre comunque più dell'80% dell'energia nell'intero spettro da 2 Hz a 5 kHz. Il rumore a 5 kHz e superiore, che risulta meno abbattuto dall'operazione di “pesatura” sui gruppi di cetacei BF e AF, è associato peraltro a livelli assoluti al di sotto dei 170 dB, inferiore a quelli associabili al semplice traffico navale.

2.2.2 Modellazione della propagazione del suono

Il calcolo dei livelli acustici a diverse distanze dalla fonte è stato pertanto effettuato per frequenze fino a 4 kHz usando un modello numerico per la propagazione del suono in acqua. Al di sopra dei 4 kHz, l'energia sonora contribuisce per meno del 20% dell'energia totale emessa e peraltro, come esplicitato in precedenza, a queste frequenze si riscontra un elevato smorzamento con la distanza.

La propagazione del suono è stata modellata da un Modello RAM (Range-dependent Acoustic Model). Il RAM si basa sulla soluzione di un'equazione parabolica, assumendo che l'energia in uscita sia dominante rispetto all'energia retrodiffusa (backscatter).

La modellazione numerica del rumore subacqueo è basata sul software Mike Underwater Acoustic Simulator (UAS), parte della recente release 2019 dei codici di calcolo DHI. Il modello

risolve in particolare la propagazione del rumore a grande distanza dalla sorgente sonora (far field), con lo scopo di fornire una base informativa a supporto della valutazione del rischio causato dall'impatto del rumore sull'ambiente marino. L'UAS applica un codice di tipo RAM basato sul modello di propagazione del suono sviluppato da Collins (1993). Questo codice tiene conto della variazione della velocità del suono e dell'attenuazione volumetrica nella colonna d'acqua e applica il modello empirico di Francois & Garrison (1982a, 1982b) per tenere conto dei valori di salinità, temperatura e pH della colonna d'acqua (paragrafi 2.1.1 e 2.1.2). In aggiunta, l'UAS permette di rappresentare la propagazione del suono attraverso il fondale. La descrizione del fondale si basa su un numero di strati (layers) a densità e spessore costante (paragrafo 2.1.3). La sorgente di emissione sonora viene modellata come una fonte puntuale omnidirezionale. Una descrizione dettagliata del modello è riportata nella Documentazione Scientifica di UAS (DHI 2019).

Per una rappresentazione realistica dell'effetto del fondale sulla propagazione delle onde sonore in mare risulta necessario prevedere l'assorbimento del suono da parte dello strato di fondo. Il modello applicato include la propagazione nel fondale ma è in grado di gestire solo le onde di compressione e non quelle di taglio, il che significa che i sedimenti sul fondale marino vengono modellati al pari di un fluido. Oltre a tenere conto delle costanti di attenuazione negli strati di fondo, è importante includere le variazioni di densità nello strato di interfaccia tra acqua e fondale per una descrizione accurata e realistica degli effetti dello strato di fondo sulla propagazione delle onde sonore. In questo caso è stata utilizzata una descrizione semplificata del fondale, basata su un numero di strati a densità costante. La condizione al contorno di fondo al termine del dominio fisico della soluzione consiste in un layer artificiale assorbente dello spessore di diverse lunghezze d'onda, in modo tale da assicurare che non vengano riflesse componenti significative dell'energia sonora. Il layer assorbente è stato modellato attribuendo specifici parametri al modello di rifrazione.

Le proprietà del suono alla sorgente sono state inserite al fine di calcolare la propagazione del suono lungo 72 piani trasversali (transetti) che si irradiano a 360° dalla fonte del rumore. Sono state modellate specifiche bande di terzo di ottava con frequenza centrale compresa tra 20 Hz a 4 kHz, che rappresenta il range più rilevante sia per lo spettro della fonte emittente applicato, sia per le specie di mammiferi marini presenti nell'area o comunque di interesse per la valutazione. In base ai calcoli effettuati, sono state quindi predisposte mappe che illustrano l'esposizione al rumore in funzione della distanza dalla fonte.

Considerando che i mammiferi marini sfruttano l'intera profondità della colonna d'acqua, i risultati delle mappe fanno riferimento il livello sonoro massimo registrato sulla colonna d'acqua per le varie distanze.

Le simulazioni effettuate col modello acustico del tipo RAM sono basate sulle semplificazioni e assunzioni specifiche qui elencate:

- la superficie del mare è considerata come una condizione al contorno semplice, orizzontale e perfettamente riflettente, ignorando quindi l'eventuale presenza di moto ondoso e il conseguente fenomeno di intrusione di bolle d'aria nello strato di acqua più superficiale, che può presentare un effetto significativo (mitigante) sulla velocità del suono in questa porzione di colonna d'acqua;
- Mike UAS è un modello 2D per il quale il suolo viene suddiviso in più layers caratterizzati da proprietà acustiche differenti. Il modello permette di considerare la batimetria a larga scala ma non permette di risolvere gli effetti locali sulla propagazione del suono di eventuali aree che presentino grosse pietre posate sul fondo o presenza di macroalghe o piante sul fondale;
- il codice di calcolo è un modello bidimensionale che ignora pertanto gli effetti tridimensionali della rifrazione orizzontale dei raggi sonori riflessi da un fondale marino a pendenza elevata. E' il caso, ad esempio delle zone di passaggio tra piattaforma e scarpata continentale o nell'intorno di isole, laddove un raggio sonoro che incontra il fondo molto pendente subisce il fenomeno della rifrazione orizzontale;

- nelle acque poco profonde, le condizioni al contorno di superficie e di fondo giocano un ruolo fondamentale, considerando la distanza limitata tra le due superfici. Quando il suono interagisce col fondale diverse volte su brevi distanze, la composizione del fondale marino diventa tanto importante quanto l'andamento della batimetria. Quindi, il suono potrebbe diffondersi significativamente non solo attraverso l'acqua ma anche dentro i sedimenti o la roccia sottostante, inducendo un'attenuazione, associata all'energia persa nel passaggio attraverso gli strati. Quando il fondale è composto da sedimenti non consolidati, come nel caso in esame, si può ragionevolmente assumere che le onde di taglio possano essere escluse dalla modellazione dell'interazione e propagazione del suono nel fondale. Di conseguenza il modello rappresenta solo l'effetto delle onde di compressione;
- nel presente studio, la fonte di rumore è stata modellata come una fonte singola puntuale⁵ alla profondità di 37 m (pari alla metà della profondità del fondale in quel punto). Combinando le assunzioni sulla posizione della fonte e la scelta del profilo primaverile di densità, si può ragionevolmente assumere che le simulazioni della propagazione del suono portino a stime conservative⁶ (par 2.1.1);
- gli effetti di campo vicino (near field) non sono stati considerati nel presente studio, dal momento che il loro peso sui livelli di pressione sonora nel campo lontano è trascurabile. Alle distanze di interesse (superiori ai 500 m dalla fonte), gli effetti dell'intensità del suono e le onde sonore oblique che prevalgono nel campo vicino alla fonte vengono fortemente attenuati.

Complessivamente, le semplificazioni adottate portano ad una stima conservativa dei livelli sonori attesi.

2.2.2.1 Impostazioni del modello numerico

In un modello alle differenze finite come quello adottato, la discretizzazione spaziale è definita in funzione della lunghezza d'onda modellata. Le simulazioni risultano pertanto sensibili alle componenti di frequenza utilizzate. La risoluzione della profondità risulta:

$$dz = \alpha \lambda \quad (2.1)$$

mentre la risoluzione radiale è definita come

$$dr = \beta dz \quad (2.2)$$

dove α rappresenta il numero di frazioni nelle quali l'onda acustica viene calcolata nella direzione verticale. Nella direzione radiale, i gradienti spaziali risultano più deboli rispetto alla direzione verticale e β viene usato per rilassare la risoluzione dell'onda di propagazione.

L'accuratezza numerica della soluzione non è determinata soltanto dalla risoluzione della griglia di calcolo, ma è anche controllata dal numero di termini di Padè considerati nell'approssimazione dell'equazione parabolica. Simulazioni in condizioni di acqua profonda spesso richiedono un numero elevato di termini nella serie di Padè per ottenere una soluzione numerica accurata, a causa dell'ampiezza elevata dell'angolo di propagazione. Un numero elevato di termini

⁵ La sorgente è considerata omnidirezionale: il rumore è assunto propagarsi radialmente su tutti i piani azimutali. Il trattare la fonte come omnidirezionale porta ad una stima conservativa dell'impatto del rumore sulle grandi distanze. Inoltre, la fonte di rumore da operazioni di perforazione è assimilabile a puntuale, coerentemente con l'assunzione di una fonte puntuale adottata nelle simulazioni.

⁶ sulla base di risultati del modello numerico

nell'approssimazione di Padé determina tuttavia, di contro, un significativo aumento del tempo computazionale.

I test di convergenza costituiscono pertanto la base per una soluzione numerica accurata. Questa parte è completamente automatizzata nell'algoritmo utilizzato dal modello UAS.

2.2.3 Pesatura, Livelli cumulati e Aree di Impatto

I risultati delle simulazioni in termini di mappe di propagazione del suono sono stati trattati in due modi diversi: per i livelli di pressione sonora non cumulati come il RMS LPS, non è stato necessario alcun ulteriore processamento. Per quanto riguarda i livelli cumulati (LES_{cum}), il 1-s LES cumulato, che corrisponde al 1-s RMS LPS (par 2.2.1), è stato ulteriormente aggregato sulle 24 ore (LES_{24h}). L'energia acustica complessiva nel periodo considerato per la definizione dei livelli cumulati è la somma del 1-s LES cumulato (LES_{1s}) su quel periodo. Considerando la conversione dalla scala dei dB all'energia e viceversa, la somma risulta

$$LES_{cum} = 10 \log_{10} \sum 10^{LES_{1s}/10} = LES_{1s} + 10 \log_{10} \frac{T}{T_0},$$

dove T è il periodo di aggregazione e $T_0 = 1$ s è la durata di riferimento applicata al LES. Per il LES_{24h} la somma è su un totale di 3600 LES_{1s} , ossia $LES_{24h} = LES_{1s} + 49.4$ dB.

In aggiunta al calcolo dei livelli cumulati, le linee guida adottate (NMFS, 2018) richiedono una pesatura per tenere conto della differente propensione a subire lesioni legate al rumore da parte delle singole specie, raggruppate in gruppi funzionali definiti "Hearing Groups". Le pesature sono state applicate allo spettro sonoro alla sorgente e il livello di trasmissione simulato (Transmission Loss - TL) è stato poi applicato allo spettro pesato, al fine di derivare le mappe di propagazione del suono come descritto in precedenza.

I risultati della pesatura e del calcolo dei livelli cumulati sono mappe di propagazione del suono che mostrano le aree di impatto associate a specifiche reazioni (o lesioni) delle varie specie considerate, raggruppate in "Hearing Groups". Per la stima dell'impatto effettivo, naturalmente, tali aree devono prevedere l'informazione della densità di presenza della specie di interesse.

2.3 Valori soglia

Gli impatti del rumore sui mammiferi marini e sulle altre specie di interesse possono essere suddivisi in quattro macro categorie che dipendono dalla vicinanza degli individui alla fonte di emissione sonora (Richardson e al. 2013): udibilità, mascheramento, cambiamenti comportamentali, lesioni fisiche temporanee o permanenti (TTS, PTS). I valori di soglia adottati per i mammiferi marini, su indicazione di Wood PLC, fanno riferimento alle già citate linee guida NOAA (NMFS 2018): NOAA ha fornito delle raccomandazioni per le soglie di innesco della manifestazione di sintomi di lesioni temporanee (TTS) e permanenti (PTS) per vari gruppi di mammiferi marini (secondo le indicazioni di Southall e al. 2007). I loro criteri sono basati sulle funzioni di pesatura della frequenza. Per i pesci e le tartarughe di mare, le soglie sono state ricavate da Popper e al. 2014. Le soglie adottate sono riportate in Tabella 2.2.

Tabella 2.2 Criteri di esposizione al rumore per i mammiferi marini, i pesci e le tartarughe di mare utilizzati nell'analisi. Le specie di mammiferi marini sono divise in gruppi in base alle definizioni della NMFS (2018).

Hearing Group	Specie	Effetto del rumore	Soglia	Fonte
Cetacei sensibili alle basse frequenze BF	Balenottera comune	PTS	199 dB re 1 μ Pa ² s LES (pesato)	NMFS 2018
		TTS	179 dB re 1 μ Pa ² s LES (pesato)	NMFS 2018
		Comportamento	120 dB re 1 μ Pa RMS LPS (non pesato)	NMFS 2018
Cetacei sensibili alle medie frequenze MF	Capodoglio; Delfino comune; Delfino dal naso a bottiglia; Zifio; Stenella striata; Grampo; Globicefalo;	PTS	198 dB re 1 μ Pa ² s LES (pesato)	NMFS 2018
		TTS	178 dB re 1 μ Pa ² s LES (pesato)	NMFS 2018
		Comportamento	120 dB re 1 μ Pa RMS LPS (non pesato)	NMFS 2018
Cetacei sensibili alle alte frequenze AF		PTS	173 dB re 1 μ Pa ² s LES (pesato)	NMFS 2018
		TTS	153 dB re 1 μ Pa ² s LES (pesato)	NMFS 2018
		Comportamento	120 dB re 1 μ Pa RMS LPS (non pesato)	NMFS 2018
Foche PW		PTS	201 dB re 1 μ Pa ² s LES (pesato)	NMFS 2018
		TTS	181 dB re 1 μ Pa ² s LES (pesato)	NMFS 2018
		Comportamento	120 dB re 1 μ Pa RMS LPS (non pesato)	NMFS 2018
Otarie OW		PTS	219 dB re 1 μ Pa ² s LES (pesato)	NMFS 2018
		TTS	199 dB re 1 μ Pa ² s LES (pesato)	NMFS 2018
		Comportamento	120 dB re 1 μ Pa RMS LPS (non pesato)	NMFS 2018
Pesci e tartarughe di mare PT		Lesione recuperabile	170 dB re 1 μ Pa RMS per 48h	Popper e al. 2014
		TTS	158 dB re 1 μ Pa RMS per 12h	

2.4 Livelli sonori

I risultati delle simulazioni sono presentati in base a diverse metriche. La presente sezione, dedicata alla metodologia, si chiude pertanto con una descrizione di come sono stati determinati i diversi livelli sonori e come sono stati combinati spettro in ingresso e Transmission Loss (TL). Il risultato standard di un modello di propagazione del suono è proprio la Transmission Loss (TL) per la banda di frequenze in terze di ottava.

$$TL_f = -20 \log_{10} \frac{P_{received}}{P_{source}} \quad (2.3)$$

La TL rappresenta la diminuzione di intensità acustica cumulata quando un'onda di pressione sonora si propaga a partire da una fonte emittente, quindi la perdita nella trasmissione dalla fonte al soggetto ricevente è espressa da:

$$LES^R = LES^{SRC} - TL \quad (2.4)$$

Dove l'apice R indica il soggetto ricevente, mentre SRC indica la fonte (source).

Visto che la TL dipende dalla frequenza, è stato calcolato il livello sonoro ricevuto per banda di terzo di ottava, oltre al livello totale di esposizione al suono ricevuto:

$$LES_{0a}^R = 10 \log_{10} \left(\sum_f 10^{0.1 LES_f^{SRC} - 0.1 PT_f} \right) \quad (2.5)$$

dove LES_f^{SRC} è il LES per banda di terza di ottava con una frequenza centrale f (si veda a tale proposito lo spettro di Figura 2.6).

Il LES totale ricevuto della (2.5) è utilizzato per determinare una Transmission Loss complessiva:

$$TL_{tot} = LES_{tot}^{SRC} - LES_{tot}^R \quad (2.6)$$

che può essere utilizzata per calcolare i valori ricevuti di LPS_{picco} e LPS_{RMS} :

$$LPS = LPS^{SRC} - TL_{tot} \quad (2.7)$$

Il calcolo viene fatto assumendo che la forma dello spettro di frequenza sia la stessa per il LES e il LPS.

2.4.1 Pesatura

Come descritto sopra, i mammiferi marini sono stati suddivisi in diversi gruppi funzionali (Hearing Groups) in base alle proprie caratteristiche uditive. Le diverse caratteristiche – espresse nel range di frequenze entro il quale gli animali possono udire – sono quantificate dal National Marine Fisheries Service (2018) da una pesatura sulla frequenza, espressa come:

$$W(f) = C + 10 \log_{10} \left(\frac{(f/f_1)^{2a}}{[1 + (f/f_1)^2]^a [1 + (f/f_2)^2]^b} \right) \quad (2.8)$$

dove i valori dei parametri a , b , e C e delle frequenze f_1 e f_2 sono riportati in Tabella 2.3. Le curve di pesatura sono rappresentate in Figura 2.7. Il range di udito è fornito in Tabella 2.3.

Il livello pesato di esposizione al suono ricevuto è quindi ottenuto pesando ciascuna banda di frequenza:

$$LES = 10 \log_{10} \left(\sum_f 10^{0.1 LES_f - 0.1 W(f)} \right) \quad (2.9)$$

Tabella 2.3 Gruppi funzionali e larghezze di banda di udibilità associate (NMFS 2018)

Hearing Groups	Range di udito	a	b	f_1 (kHz)	f_2 (kHz)	C (dB)
Cetacei BF	7 Hz – 35 kHz	1.0	2	0.2	19	0.13
Cetacei MF	150 Hz – 160 kHz	1.6	2	8.8	110	1.20
Cetacei AF	275 Hz – 160 kHz	1.8	2	12	140	1.36
Foche (PW)	50 Hz – 86 kHz	1.0	2	1.9	30	0.75
Otarie (OW)	60 Hz – 39 kHz	2.0	2	0.94	25	0.64

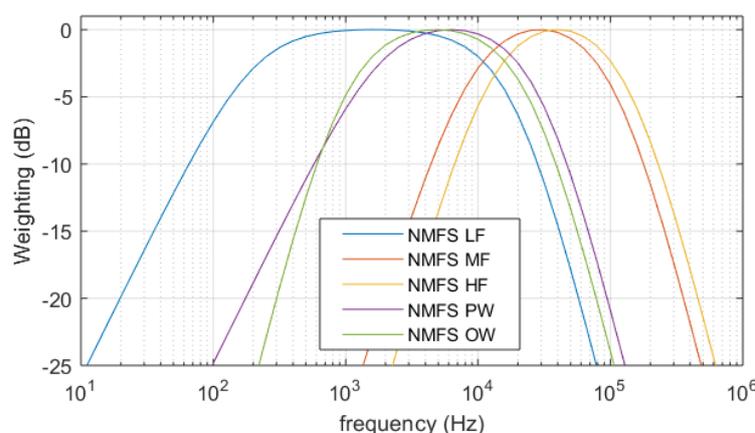


Figura 2.7 Pesature NOAA applicate. Si ricorda il range modellato arriva fino a 4 kHz. Lo spettro pesato della sorgente sonora è mostrato in Figura 2.6

3 Risultati

Nella presente sezione vengono illustrati i risultati delle simulazioni effettuate. Dopo una descrizione generale del campo sonoro, sono forniti grafici esemplificativi della propagazione del suono per ciascun gruppo funzionale, insieme ai valori tabellari delle distanze e dei valori di soglia.

3.1 Livelli sonori

I livelli sonori vengono presentati in dettaglio per i livelli di pressione sonora RMS riferiti a 1 μPa e al livello di esposizione al suono cumulato sulle 24 ore.

3.1.1 RMS LPS

Considerato che i mammiferi marini sfruttano l'intera profondità della colonna d'acqua, il risultato fornito è riferito al livello sonoro massimo ricevuto lungo la colonna d'acqua a meno che la specifica profondità non sia esplicitamente menzionata.

La mappa del rumore (Figura 3.1) mostra che il RMS LPS crolla rapidamente con l'aumentare della distanza dalla fonte emittente. La TL in acqua bassa (< 50 m), è maggiore rispetto alla TL registrata in acque profonde, determinando pertanto una forma ellittica delle isoplete.

I transetti riportati (Figura 3.2) mostrano come il suono predilige per la propagazione lungo un "canale preferenziale" posto a circa 50 metri di profondità. Nel transetto 1, la propagazione del

rumore è soppressa a circa 70 km di distanza. La forte pendenza della batimetria potrebbe causare fenomeni di rifrazione che non sono calcolati dall'algoritmo di propagazione RAM, ma a meno di 50 km di distanza dalla fonte i livelli sonori sono risultati già al di sotto dei tipici valori di background marino, pari a 100–110 dB re 1 μ Pa, pertanto la potenziale rifrazione non risulta rilevante.

A causa dei bassi livelli assoluti di pressione sonora, i pattern di propagazione a distanze maggiori dalla fonte (>50 km) non risultano di particolare interesse.

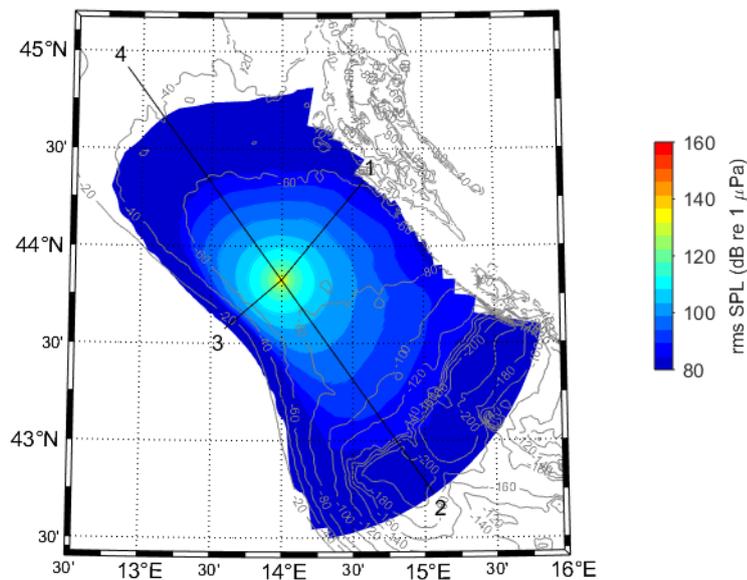


Figura 3.1 Mappa del rumore da attività di perforazione. La batimetria è indicata dalle linee grigie, mentre le linee nere mostrano la posizione dei piani 2D selezionati e rappresentati in Figura 3.2. I numeri in nero si riferiscono al numero del transetto indicato nel testo

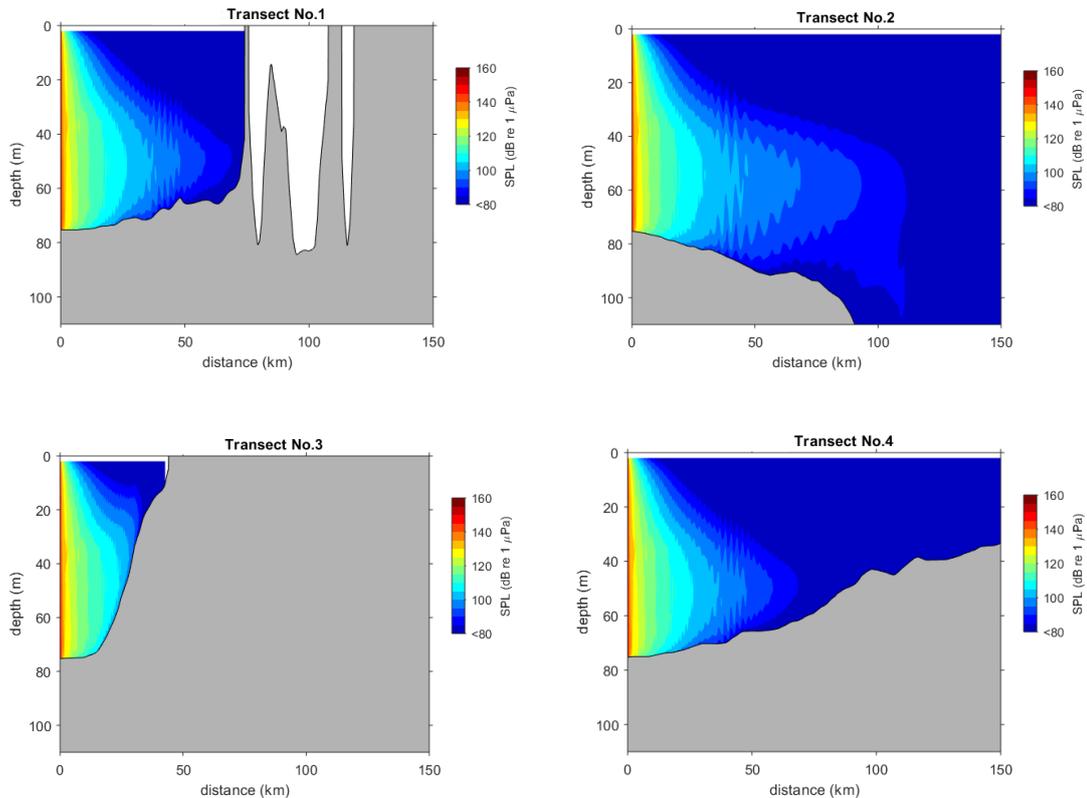


Figura 3.2 Mappa del rumore da attività di perforazione sui singoli transetti 2D selezionati. La posizione planimetrica dei transetti è mostrata in Figura 3.1

Lungo il transetto 2, la propagazione del suono è nuovamente concentrata lungo un canale preferenziale localizzato tra i 40 e i 60 m di profondità. La profondità dell'acqua tende ad aumentare con la distanza dalla fonte e la perdita di trasmissione TL è risultata globalmente inferiore rispetto al transetto 1, con conseguenti livelli sonori maggiori a pari distanza. Il livello assoluto rimane comunque al di sotto dei tipici valori di background entro i 50 km dalla fonte. Al di sopra dei 100 km si osserva una propagazione residua dell'energia sonora verso gli strati più profondi.

Il transetto 3 è caratterizzato da minore distanza dalla costa rispetto agli altri transetti analizzati. Come visto per gli altri transetti, i primi 20 metri di colonna d'acqua in superficie sono caratterizzati da una perdita di trasmissione TL maggiore rispetto agli strati più profondi. I livelli di pressione sonora crescono al di sopra del valore di background fino al limite delle alte profondità ma scendono nuovamente al di sotto dello stesso valore quando la profondità dell'acqua raggiunge i 40 m. Come per il transetto 1, il potenziale fenomeno di rifrazione che potrebbe manifestarsi vista la conformazione della batimetria non risulta rilevante a causa dei bassi livelli assoluti.

Il transetto 4 mostra la propagazione del suono per un profilo di graduale diminuzione della profondità dell'acqua e risulta quindi comparabile al transetto 1, ma in questo caso la propagazione non viene soppressa dal basso fondale. Le perdite di trasmissione TL risultano comunque maggiori rispetto al transetto 2, dove la profondità dell'acqua tendeva ad aumentare con la distanza dalla fonte, sottolineando quindi il forte contributo della profondità del fondale come causa di attenuazione del rumore.

3.2 Distanze dai valori soglia

Le soglie comportamentali per tutti i gruppi funzionali di interesse sono state applicate al LES non pesato. La distanza di impatto per i cetacei BF, MF e AF, per le foche e per le otarie risulta in media di 7.85 km e al massimo di 7.9 km (da Figura 3.3 a Figura 3.7, linea verde, e da Tabella 3.1 a Tabella 3.6), per un'area di impatto in termini di risposta comportamentale pari a 190 km².

Entrambe le distanze di TTS e di PTS per questi animali sono state calcolate in base al valore pesato di LES cumulato sulle 24 ore. Le soglie per le lesioni recuperabili e per il TTS per i pesci e le tartarughe marine sono state applicate al valore non pesato di LPS.

3.2.1 Cetacei BF (Bassa Frequenza)

Il TTS cumulato sulle 24 ore per i cetacei a BF raggiunge il suo valore sia medio che massimo a una distanza di 2.4 km dalla fonte emittente (Figura 3.3, linea blu). L'area di impatto per il TTS risulta essere di 18 km². Per quanto riguarda il PTS cumulato sulle 24 ore, la distanza relativa al suo valore medio e massimo si riduce a 0.2 km (Figura 3.3, linea nera tratteggiata). L'area di impatto per il PTS cumulato sulle 24 ore è di 0.12 km² (Tabella 3.1).

Tabella 3.1 Distanze limite e aree di impatto per i cetacei BF. Le soglie di LES si riferiscono al LES pesato sulle basse frequenze, ad eccezione della soglia comportamentale che si riferisce al LES non pesato

Soglia	Distanza media (km)	Distanza max. (km)	Area di impatto (km ²)
comportamentale	7.85	7.9	190
TTS (24-h cum.)	2.4	2.4	18
PTS (24-h cum.)	0.2	0.2	0.12

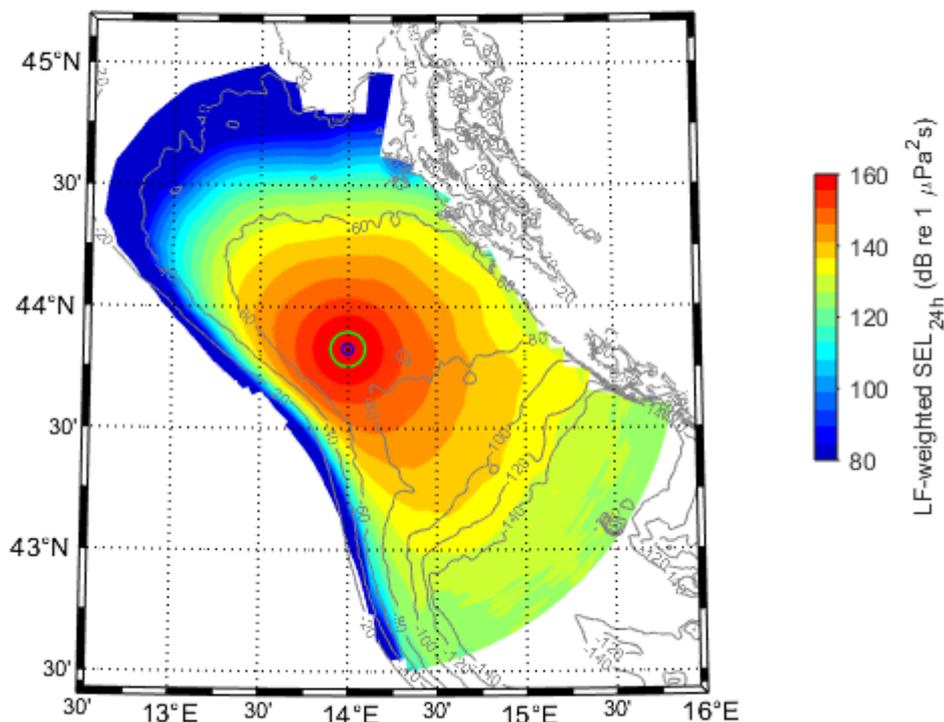


Figura 3.3 LES cumulati sulle 24 ore con una pesatura NMFS sulle basse frequenze (SEL_{24h}) per le attività di trivellazione del pozzo Calipso 5 DIR. La linea verde evidenzia il livello di soglia comportamentale, la linea blu indica la soglia per il TTS e quella nera la soglia del PTS

3.2.2 Cetacei MF (Media Frequenza)

A causa della diversa pesatura utilizzata per i cetacei MF rispetto a quella usata per i cetacei BF, le distanze di impatto per il gruppo MF sono risultate inferiori rispetto a quelle dei cetacei BF. In questo caso, le soglie cumulate sulle 24 ore per TTS e PTS raggiungono la loro media e il massimo ad una distanza di 0.1 km dalla fonte (Figura 3.4 e Figura 3.5, linea nera tratteggiata). L'area di impatto per entrambi i parametri TTS e PTS è pari a 0.03 km² (Tabella 3.2).

Tabella 3.2 Distanze limite e aree di impatto per i cetacei MF. Le soglie di LES si riferiscono al LES pesato sulle medie frequenze, ad eccezione della soglia comportamentale che si riferisce al LES non pesato

Soglia	Distanza media (km)	Distanza max. (km)	Area di impatto (km ²)
comportamentale	7.85	7.9	190
TTS (24-h cum.)	0.1	0.1	0.03
PTS (24-h cum.)	0.1	0.1	0.03

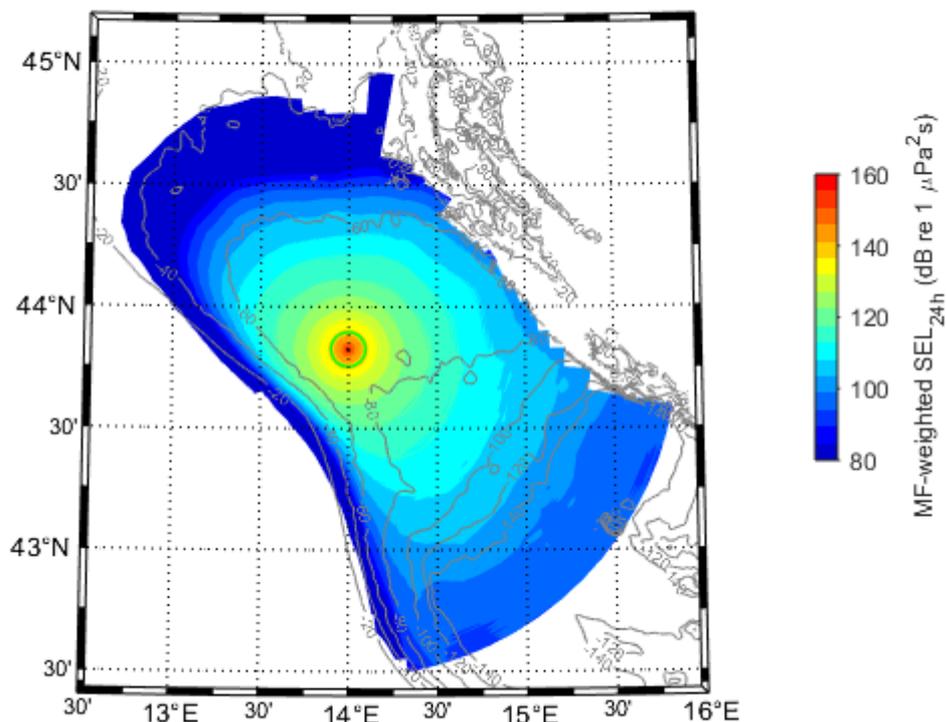


Figura 3.4 LES cumulati sulle 24 ore con una pesatura NMFS sulle medie frequenze (SEL_{24h}) per le attività di trivellazione del pozzo Calipso 5 DIR. La linea verde evidenzia il livello di soglia comportamentale, la linea blu indica la soglia per lo TTS e quella nera la soglia dello PTS

3.2.3 Cetacei AF (Alta Frequenza)

Il TTS cumulato sulle 24 ore per i cetacei AF raggiunge il valore sia medio che massimo a una distanza di 0.8 km dalla fonte emittente, con un'area di impatto di 2 km². La distanza per il PTS cumulato sulle 24 ore risulta molto inferiore, con una media e un massimo entrambi pari a 0.1 km (Figura 3.5, linea nera tratteggiata). In questo caso l'area di impatto scende a 0.03 km² (Tabella 3.3).

Tabella 3.3 Distanze limite e aree di impatto per i cetacei AF. Le soglie di LES si riferiscono al LES pesato sulle alte frequenze, ad eccezione della soglia comportamentale che si riferisce al LES non pesato

Soglia	Distanza media (km)	Distanza max. (km)	Area di impatto (km ²)
comportamentale	7.85	7.9	190
TTS (24-h cum.)	0.8	0.8	2
PTS (24-h cum.)	0.1	0.1	0.03

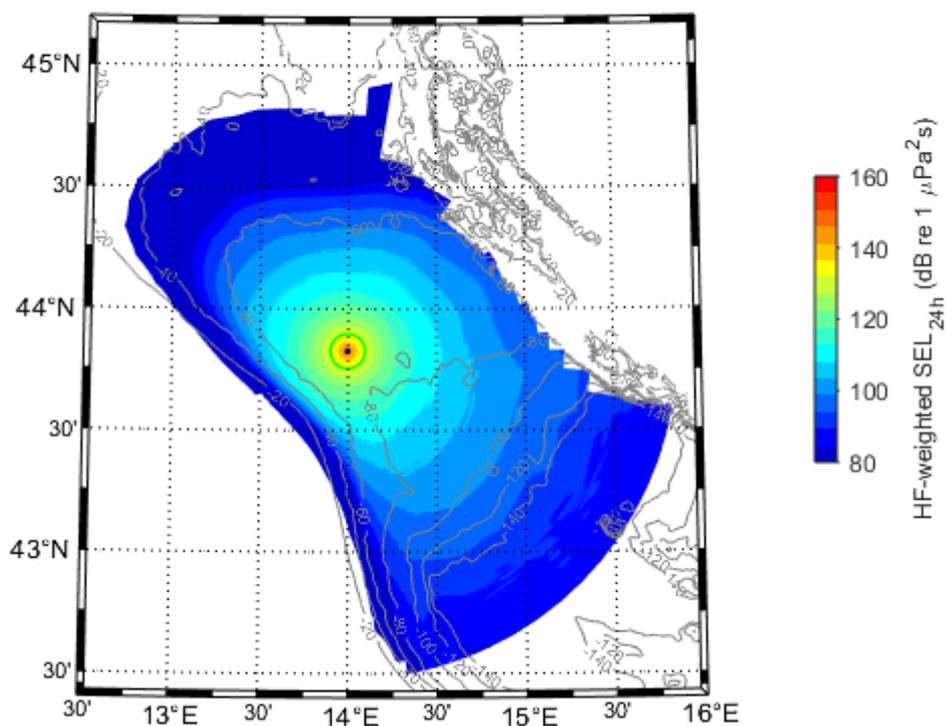


Figura 3.5 LES cumulati sulle 24 ore con una pesatura NMFS sulle alte frequenze (SEL_{24h}) per le attività di trivellazione del pozzo Calipso 5 DIR. La linea verde evidenzia il livello di soglia comportamentale, la linea blu indica la soglia per il TTS e quella nera la soglia del PTS

3.2.4 Foche (PW)

Le distanze di soglia del TTS cumulato sulle 24 ore per le foche oscillano intorno a 0.7 km, scendendo a 0.1 km per quanto riguarda il PTS (Figura 3.6, Tabella 3.4).

Tabella 3.4 Distanze di soglia e aree di impatto per le foche (PW). Le soglie di LES si riferiscono al LES pesato col NMFS PW, ad eccezione della soglia comportamentale che si riferisce al LES non pesato.

Soglia	Distanza media (km)	Distanza max. (km)	Area di impatto (km ²)
comportamentale	7.85	7.9	190
TTS (24-h cum.)	0.7	0.7	1.5
PTS (24-h cum.)	0.1	0.1	0.03

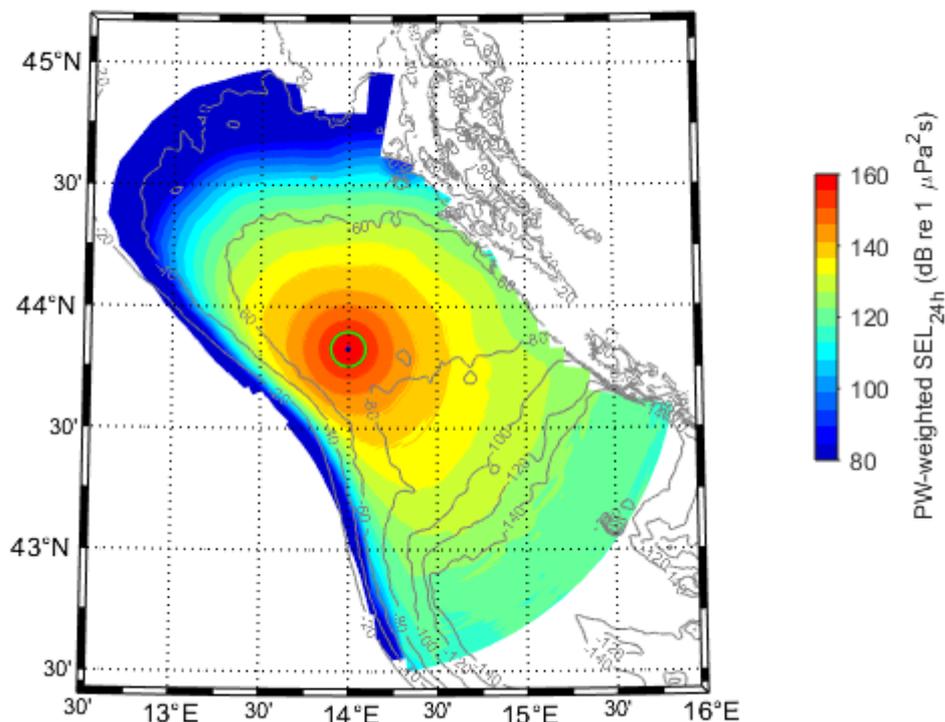


Figura 3.6 LES cumulati sulle 24 ore con una pesatura NMFS PW (SEL_{24h}) per le attività di trivellazione del pozzo Calipso 5 DIR. La linea verde evidenzia il livello di soglia comportamentale, la linea blu indica la soglia per lo TTS e quella nera la soglia dello PTS

3.2.5 Otarie (OW)

A causa dei diversi valori soglia e della diversa pesatura utilizzata per le otarie rispetto alle foche, i range di impatto per il TTS cumulato sulle 24 ore per le otarie è risultato inferiore rispetto a quello delle foche.

Il TTS cumulato sulle 24 ore per le otarie presenta una soglia di distanza media e massima uguale a quella delle foche, pari a 0.1 km. L'area di impatto per il TTS risulta pari a 0.03 km² (Figura 3.7, Tabella 3.5).

Tabella 3.5 Distanze di soglia e aree di impatto per le otarie (OW). Le soglie di LES si riferiscono al LES pesato col NMFS OW, ad eccezione della soglia comportamentale che si riferisce al LES non pesato

Soglia	Distanza media (km)	Distanza max. (km)	Area di impatto (km ²)
comportamentale	7.85	7.9	190
TTS (24-h cum.)	0.1	0.1	0.03
PTS (24-h cum.)	0.1	0.1	0.03

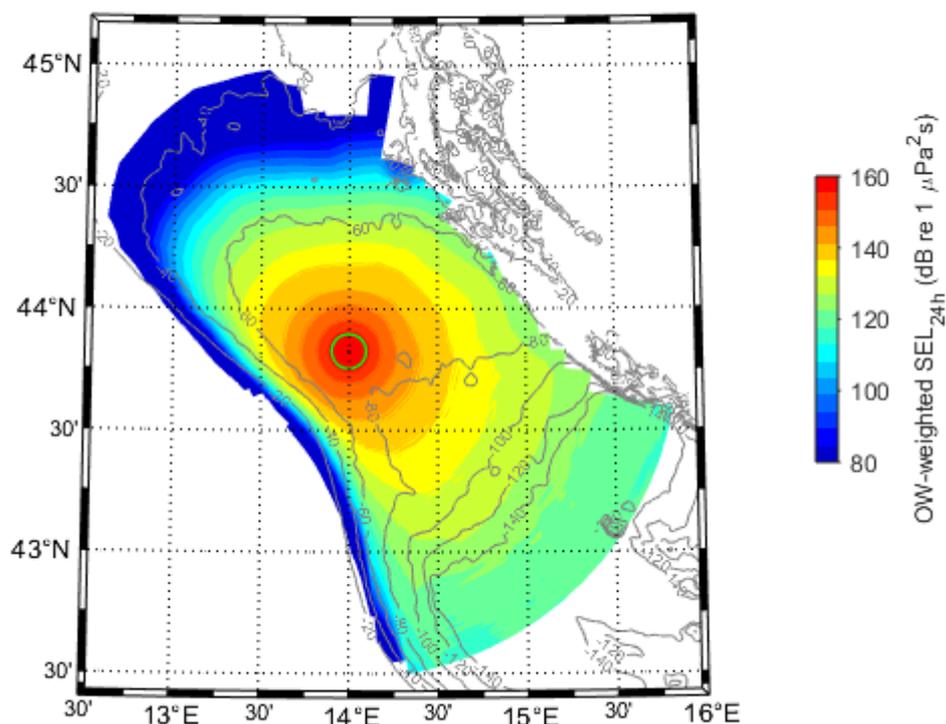


Figura 3.7 LES cumulati sulle 24 ore con una pesatura NMFS OW (SEL_{24h}) per le attività di trivellazione del pozzo Calipso 5 DIR. La linea verde evidenzia il livello di soglia comportamentale, la linea blu indica la soglia per lo TTS e quella nera la soglia dello PTS

3.2.6 Pesci e tartarughe marine

La distanza massima e media di soglia relativa alle lesioni recuperabili e al TTS per pesci e tartarughe marine risultano pari a 0.1 km, per un'area di impatto di 0.03 km² (Figura 3.8, Tabella 3.6).

Tabella 3.6 Distanze di soglia e area di impatto per pesci e tartarughe marine. La soglia del LPS si riferisce a un LPS non pesato

Soglia	Distanza media (km)	Distanza max. (km)	Area di impatto (km ²)
Lesioni recuperabili	0.1	0.1	0.03
TTS	0.1	0.1	0.03

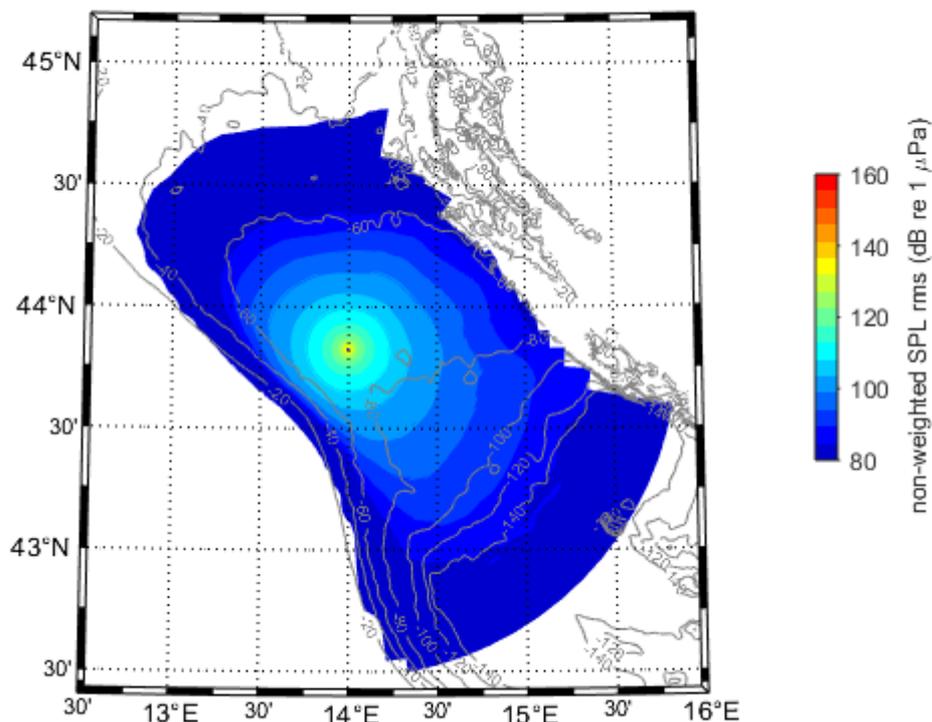


Figura 3.8 LPS per le attività di trivellazione del pozzo Calipso 5 DIR. Il punto blu indica la soglia per le lesioni recuperabili e per il TTS

3.3 Sommario

Le distanze di soglia e le aree di impatto risultano generalmente molto basse per tutti i gruppi uditivi di cetacei, pinnipedi, pesci e tartarughe di mare. La specie più sensibile al rumore provocato dalle attività di trivellazione previste, in base alle soglie definite dal NMFS (2018), è risultata essere quella dei cetacei BF, mostrando uno spostamento temporaneo di soglia (TTS) fino a una distanza di 2.4 km e uno spostamento permanente di soglia (PTS) per distanze fino a 0.2 km. L'area di impatto per il TTS per i cetacei BF raggiunge i 18 km², mentre per il PTS si limita a 0.12 km² (Tabella 3.7).

Nel recente rapporto CNR "Cetacei marini e rettili marini nell'area vasta del bacino adriatico – presenza e distribuzione" è peraltro evidenziato che il *T. truncatus* (cetaceo appartenente al gruppo uditivo "media frequenza") risulta di gran lunga la specie più comune facendo riferimento ad un vasto areale intorno alla piattaforma Calipso. Per tale gruppo uditivo il modello ha fornito uno Spostamento Temporaneo di Soglia uditiva (TTS) e uno Spostamento Permanente di Soglia uditiva (PTS) per distanze non superiori a 0.1 km, corrispondenti ad aree di impatto, sia per TTS che per PTS, pari a 0.03 km².

Infine, va sottolineato che le principali assunzioni adottate per il modello numerico (livello sonoro alla fonte, scelta del profilo di velocità del suono, posizionamento della sorgente in termini di profondità nella colonna d'acqua) risultano ampiamente conservative.

Tabella 3.7 Tabella riassuntiva delle massime distanze e delle aree di impatto

Hearing Group	Parametri della pesatura	Effetto	Soglia	Distanza max. (km)	Area di impatto (km ²)
Cetacei BF	$a = 1$ $b = 2$ $f_1 = 0.2\text{kHz}$ $f_2 = 19\text{ kHz}$ $C = 0.13\text{ dB}$	PTS	199 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ LES (pesato)	0.2	0.12
		TTS	179 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ LES (pesato)	2.4	18
		Comportamento	120 dB re 1 μPa MQ LPS (non pesato)	7.9	190
Cetacei MF	$a = 1.6$ $b = 2$ $f_1 = 8.8\text{kHz}$ $f_2 = 110\text{kHz}$ $C = 1.20\text{ dB}$	PTS	198 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ LES (pesato)	0.1	0.03
		TTS	178 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ LES (pesato)	0.1	0.03
		Comportamento	120 dB re 1 μPa MQ LPS (non pesato)	7.9	190
Cetacei AF	$a = 1.8$ $b = 2$ $f_1 = 12\text{kHz};$ $f_2 = 140\text{kHz}$ $C = 1.36\text{ dB}$	PTS	153 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ LES (pesato)	0.1	0.03
		TTS	173 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ LES (pesato)	0.8	2
		Comportamento	120 dB re 1 μPa MQ LPS (non pesato)	7.9	190
Foche	$a = 1.0$ $b = 2$ $f_1 = 1.9\text{kHz}$ $f_2 = 30\text{kHz}$ $C = 0.75\text{ dB}$	PTS	201 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ LES (pesato)	0.1	0.03
		TTS	181 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ LES (pesato)	0.7	1.5
		Comportamento	120 dB re 1 μPa MQ LPS (non pesato)	7.9	190
Otarie	$a = 2.0$ $b = 2$ $f_1 = 0.94\text{kHz}$ $f_2 = 25\text{kHz}$ $C = 0.64\text{ dB}$	PTS	219 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ LES (pesato)	0.1	0.03
		TTS	199 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ LES (pesato)	0.1	0.03
		Comportamento	120 dB re 1 μPa MQ LPS (non pesato)	7.9	190
Pesci e tartarughe di mare	Nessuna pesatura	Lesioni recuperabili	170 dB re 1 μPa MQ per 48h	0.1	0.03
		TTS	158 dB re 1 μPa MQ per 12h	0.1	0.03

4 Bibliografia

- BOEM (Bureau of Ocean Energy Management). 2017. Gulf of Mexico OCS Proposed Geological and Geophysical Activities. Final Environmental Impact Statement, OCS EIS/EA BOEM 2017-051. New Orleans, Louisiana: Department of the Interior.
- Boyer, T.P., J. I. Antonov, O. K. Baranova, C. Coleman, H. E. Garcia, A. Grodsky, D. R. Johnson, R. A. Locarnini, A. V. Mishonov, T.D. O'Brien, C.R. Paver, J.R. Reagan, D. Seidov, I. V. Smolyar, and M. M. Zweng. 2013. "World Ocean Database 2013." In NOAA Atlas NESDIS 72, 209 pp. Silver Spring, MD.
- Collins, Michael D. 1993. 'A split-step Padé solution for the parabolic equation method', *The Journal of the Acoustical Society of America*, 93: 1736-42.
- Consiglio Nazionale delle Ricerche - IRBIM (Istituto per le Risorse Biologiche e le Biotecnologie Marine). 2019. 'Cetacei marini e rettili marini nell'area vasta del bacino adriatico – presenza e distribuzione".
- DHI. 2019. "UAS in MIKE, Underwater Acoustic Simulation Module, Scientific Documentation." In. Hørsholm, Denmark: DHI.
- Eni S.p.A.. "Doc. SICS_219 – Pozzo offshore "Calipso 5 Dir" – Studio di Impatto Ambientale – Quadro di riferimento progettuale, Luglio 2018"
- Erbe, C., C. McPherson. 2017. 'Underwater noise from geotechnical drilling and standard penetration testing', *Journal of the Acoustical Society of America* 142, EL281 (2017); doi: 10.1121/1.5003328
- Francois, R. E., and G. R. Garrison. 1982a. 'Sound absorption based on ocean measurements. Part I : Pure water and magnesium sulphate contributions', *Journal of the Acoustical Society of America*, 72: 896-907.
- . 1982b. 'Sound absorption based on ocean measurements. Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption', *Journal of the Acoustical Society of America*, 72: 1879-90.
- Genesis. 2011. Review and Assessment of Underwater Sound Produced from Oil and Gas Sound Activities and Potential Reporting Requirements under the Marine Strategy Framework Directive. Genesis Oil and Gas Consultants report for the Department of Energy and Climate Change – J71656.
- Gill, A.B., M. Bartlett, and F. Thomsen. 2012. 'Potential interactions between diadromous teleosts of UK conservation importance and electromagnetic fields and subsea noise from marine renewable energy developments', *Journal of Fish Biology*, 81: 664–95.
- Greene, C. R. 1987. 'Characteristics of oil industry dredge and drilling sounds in the Beaufort Sea', *Journal of the Acoustical Society of America* 82, 1315 (1987); doi: 10.1121/1.395265
- Hildebrand J. 2004. Sources of anthropogenic sound in the marine environment. [Internet]. In: Vos E, Reeves RR, editors. Report of an international workshop: policy on sound and marine mammals; 2004 Sep 28-30; London, England. Bethesda (MD): Marine Mammal Commission. [cited 2008 Jul 21]. 129 p. Available from: <http://www.mmc.gov/sound/internationalwrkshp/pdf/hildebrand.pdf>.
- Jensen, F.B., W.A. Kuperman, M. Porter, B.,, and H. Schmidt. 2011. Computational Ocean Acoustics Second Edition (Springer: New York, Dordrecht, Heidelberg, London).
- Kyhn, L., S. Sveegaard, J. Tougaard. 2014. 'Underwater noise emissions from a drillship in the Arctic', *Marine Pollution Bulletin* 86 (2014) 424-433.

Landrø, M., Amundsen, L. 2011. Marine Seismic Source Part VI: High Frequency Signals From Air-Guns. GEO ExPro Vol. 8, No. 1: 68-72.

Locarnini, R. A., A. V. Mishonov, J. I. Antonov, T. P. Boyer, H. E. Garcia, O. K. Baranova, M. M. Zweng, C. R. Paver, J. R. Reagan, D. R. Johnson, M. Hamilton, and D. Seidov. 2013. "World Ocean Atlas 2013, Volume 1: Temperature " In NOAA Atlas NESDIS 73, edited by S. Levitus, 40 pp. Washington: National Oceanic and Atmospheric Administration

Matuschek, R., and K. Betke. 2009. "Measurements of Construction Noise During Pile Driving of Offshore Research Platforms and Wind Farms." In NAG/DAGA 2009 International Conference on Acoustics. Rotterdam

MEDAR Group, 2002 – MEDATLAS/2002 database. Mediterranean and Black Sea database of temperature salinity and bio-chemical parameters. Climatological Atlas. IFREMER Edition (4 Cd).

National Marine Fisheries Service (NMFS). 2016. "Technical Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing: Underwater Acoustic Thresholds for Onset of Permanent and Temporary Threshold Shifts." In NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-55, 178 p.: U.S. Dept. of Commer., NOAA.

National Marine Fisheries Service (NMFS). 2018. "2018 Revisions to: Technical Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing (Version 2.0): Underwater Thresholds for Onset of Permanent and Temporary Threshold Shifts." U.S. Dept. of Commer., NOAA. NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-59, 167 p.

Padilla y Sánchez, R. J. 2007. "Evolución geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México", Boletín De La Sociedad Geológica Mexicana, Tomo Lix, 1: 19-42

Popper, A. N., A. D. Hawkins, R. R. Fay, D. A. Mann, S. Bartol, T. J. Carlson, S. Coombs, W. T. Ellison, R. L. Gentry, M. B. Halvorsen, S. Lokkeborg, P. H. Rogers, B. L. Southall, D. G. Zeddies, W. N. Tavolga. 2014. 'Sound Exposure Guidelines for Fishes and Sea Turtles: A Technical Report prepared by ANSI-Accredited Standards Committee S3/SC1 and registered with ANSI, 76 p.

Regional EBS Report. 2018. Regional environmental baseline study contract area AS-CS-14 Cuencas Del Sureste, Gulf of Mexico. Draft Report, Sep. 2018.

Richardson, W John, Charles R Greene Jr, Charles I Malme, and Denis H Thomson. 2013. Marine mammals and noise (Academic press).

Southall, B.L., A.E. Bowles, W.T. Ellison, J.J. Finneran, R.L. Gentry, C.R. Jr. Greene, D. Kastak, D.R. Ketten, J.H. Miller, P.E. Nachtigall, W.J. Richardson, J.A. Thomas, and P. Tyack. 2007. 'Marine mammal noise exposure criteria: initial scientific recommendations', Aquatic Mammals, 33: 411-521.

Spence, J., R. Fischer, M. Bahtiarian, L. Boroditsky, N. Jones, and R. Dempsey. 2007. "Review of Existing and Future Potential Treatments for Reducing Underwater Sound from Oil and Gas Industry Activities." In. London: Joint Industry Programme on E&P Sound and Marine Life.

Thomsen, F., K. Lüdemann, R. Kafemann, and W. Piper. 2006. "Effects of offshore wind farm noise on marine mammals and fish, biola, Hamburg, Germany on behalf of COWRIE Ltd." In. Newbury, UK.

Urick, R. 1983. Principles of underwater sound (McGraw Hill, New York).

Wyatt, R. 2008. Review of existing data on underwater sounds produced by the oil and gas industry. Oil and Gas Producers (OGP) Joint Industry Programme report on Sound and Marine Life.

Zweng, M.M, J.R. Reagan, J.I. Antonov, R.A. Locarnini, A.V. Mishonov, T.P. Boyer, H.E. Garcia, O.K. Baranova, D.R. Johnson, D. Seidov, and M.M. Biddle. 2013. "World Ocean Atlas 2013, Volume 2: Salinity." In NOAA Atlas NESDIS 74, edited by S. Levitus, 39 pp. Washington: National Oceanic and Atmospheric Administration